

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** : Bouchenak Mohammed Imad Eddine et Larbaoui Zakarya

### **Sujet**

**Mise à niveau d'une installation solaire photovoltaïque**

Soutenu publiquement, le 22 / 06 / 2025 , devant le jury composé de :

Mr BRIXI NIGASSA M.A	MAA	Université de Tlemcen	Président
Mr DRIS Younes	MCA	Université de Tlemcen	Examineur
Mr MECHERNENE Abdelkader	MCA	Université de Tlemcen	Encadreur
Mr LOUCIF Mourad	MCA	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2024 / 2025

---

## Dedicaces 1

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 très chers frères Mortada Ratib.

à toute la famille Bouchenak,Guellil,et tous mes proches .

A mes chers amis de longue date : Mouad, Houcin, Baghdad,Walid ,Abdelghani,Akram,Zaki ,Ahmed

Enfin à toute la promotion Electrotechnique, option Commande électrique de l'année 2024-2025

Bouchenak Mohammed Imad Eddine

---

## 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 .
- A mes chers amis de longue date : Hocine, Baghdad, Akram
- Enfin à toute la promotion Electrotechnique, option Commande électrique de l'année 2024-2025

Larbaoui Zakaria

---

## 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.

En premier lieu, nous tenons à exprimer notre gratitude à nos encadrants, Mr Abdelkader MECHERNENE et Mr Loucif Mourad tout deux Maitre de Conférences à l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, pour nous avoir proposé et dirigé ce travail, nous les remercions pour nous avoir fait profiter de leur expérience, pour orientations qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous sommes sensibles à l'honneur que nous a fait Mr BRIKCI NIGASSA Mohammed Amine, pour avoir accepté de présider et de nous honorer de sa présence au sein du jury de soutenance du présent mémoire ; qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance et de notre respect.

Enfin, nous tenons également à adresser nos vifs remerciements au Mr Dris Younes, nous le remercions chaleureusement pour avoir accepté d'examiner le présent mémoire et pour ses observations et remarques pertinentes et constructives.

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

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

*Bouchenak Mohammed Imad Eddine      Larbaoui Zakaria*

# TABLE DES MATIÈRES

DEDICACES 1	1
DEDICACES 2	2
REMERCIEMENTS	3
TABLE DES MATIÈRES	6
NOMENCLATURE	9
GLOSSAIRE	11
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
<b>I TECHNOLOGIE DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES PHOTOVOLTAÏQUES</b>	<b>3</b>
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	19
I.6 AUTOCONSOMMATION ÉNERGÉTIQUES	19
I.6.1 Définition d'autoconsommation photovoltaïque	19
I.6.2 Différent types d'autoconsommation	19
I.6.2-a Direct	20
I.6.2-b Avec revente	20
I.6.2-c Avec stockage	21

I.6.3	Avantages d'autoconsommation	22
I.7	CONCLUSION	22
II	PRINCIPE ET RÉALISATION MATÉRIELLE DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE	<b>23</b>
II.1	STRUCTURE ET FONCTIONNALITÉS DU SYSTÈME DE MESURE DE PUISSANCE	25
II.1.1	Mesure de la tension	25
II.1.2	Mesure du courant	26
II.1.3	Unité de traitement : ESP32	26
II.1.4	Commande par relais	27
II.2	PRÉSENTATION DU SITE	27
II.2.1	Présentation du site locaux de laboratoires	27
II.2.2	Présentation de la microcentrale PV existante	28
II.2.3	Exemples de routeur photovoltaïque	28
II.2.3-a	Routeur photovoltaïque Arsun	29
II.2.3-b	Routeur photovoltaïque Shelly EM	29
II.2.3-c	Routeur décodant le Linky	30
II.2.4	Cahier des charges	30
II.3	MODULE DE DÉVELOPPEMENT ESP32	31
II.3.1	Description de la carte ESP32 WROOM	32
II.3.2	Caractéristiques techniques de la carte ESP32 WROOM	32
II.3.3	Broches la carte ESP32 WROOM	33
II.3.4	Convertisseur Analogique-Numérique (ADC)	34
II.3.5	Convertisseur Numérique-Analogique (DAC)	34
II.3.6	SPI (Serial Peripheral Interface)	34
II.3.7	I2C (Inter-Integrated Circuit)	34
II.3.8	PWM (Pulse Width Modulation)	35
II.3.9	Interruptions externes	35
II.3.10	Montage et connexions électriques	35
II.3.11	Résultats et interprétations	36
II.3.12	Résultats avec alimentation 1 ordinateur	36
II.3.13	Résultats avec alimentation 2 ordinateur	37
II.3.14	Résultats avec alimentation 11 lamp	37
II.3.15	Conclusion	39
III	RÉALISATION MATÉRIELLE DU ROUTEUR PHOTOVOLTAÏQUE	<b>40</b>
III.1	INTRODUCTION	41
III.2	ROUTEUR PHOTOVOLTAÏQUE	41
III.2.1	Fonctionnalités d'un routeur photovoltaïque	41
III.2.2	Schéma fonctionnel du système proposé	41
III.2.3	Connexion WiFi	42
III.3	CAPTEUR JSY-MK-194T	43
III.3.1	Définition	43
III.3.2	Principe des mesures (tension alternative, courant alternatif)	43
III.4	CIRCUIT DE BRANCHEMENT À L'ESP32	43
III.5	PRÉSENTATION DU MODULE GRADATEUR AC ROBOTDYN	45

---

III.5.1	Description du module . . . . .	45
III.5.2	Gradateur Triac 16A/24A . . . . .	45
III.6	RÉALISATION MATÉRIELLE . . . . .	47
III.6.1	Matériel demandé . . . . .	47
III.6.2	Montage électrique . . . . .	48
III.6.3	Connections électriques du routeur photovoltaïque . . . . .	49
III.6.4	ESP32 Wroom avec Écran lcd 1286B-v2.3 et extension des GPIOs . . . . .	50
III.6.5	definition . . . . .	50
III.6.6	Spécificités du modèle 1286B-v2.3 . . . . .	50
III.6.7	Avantages et limites . . . . .	50
III.7	CONCLUSION . . . . .	51
IV	RÉALISATION LOGICIELLE ET INTERFACAGES . . . . .	52
IV.1	INTRODUCTION . . . . .	53
IV.2	CONCEPTION LOGICIELLES . . . . .	53
IV.2.1	Calcule des valeurs efficaces de la tension et du courant . . . . .	55
IV.2.2	Calcul des puissances active et apparente . . . . .	55
IV.2.3	Fonctionnalités du code . . . . .	56
IV.3	INTERFAÇAGE DU ROUTEUR SUR PAGE WEB . . . . .	57
IV.3.1	Résultats . . . . .	57
IV.3.1-a	a panneaux . . . . .	57
IV.3.1-b	Avec panneaux . . . . .	59
IV.3.2	Interprétations . . . . .	59
IV.4	INTERFAÇAGE DU ROUTEUR SUR UN SERVICE EN LIGNE . . . . .	59
IV.4.1	Service ThingSpeak . . . . .	60
IV.4.2	Configuration ThingsSpeak . . . . .	60
IV.4.3	Résultats sous ThingsSpeak . . . . .	62
IV. 4.4	Interprétations : . . . . .	64
IV.5	CONCLUSION . . . . .	64
	CONCLUSION GÉNÉRALE . . . . .	67
	BIBLIOGRAPHIE . . . . .	71
	ANNEXE A . . . . .	2
	ANNEXE B : CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES PRINCIPAUX COMPOSANTS UTILISÉES . . . . .	7

# TABLE DES FIGURES

I.1	Système solaire photovoltaïque [54]	5
I.2	Principe de la conversion photovoltaïque [51].	6
I.3	Chaîne de la conversion photovoltaïque.	7
I.4	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [28].	8
I.5	Types des technologies photovoltaïque	8
I.6	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque[51]	9
I.7	Courbe courant -tension d'une cellule photovoltaïque [51].	11
I.8	Composition d'un panneau photovoltaïque [19]	11
I.9	Courbe courant-tension d'un panneau photovoltaïque change en fonction de l'ensoleillement[19].	12
I.10	Présentation du point maximale [38]	13
I.11	Système photovoltaïque autonome en site isolé	15
I.12	Différents types des systèmes photovoltaïques autonomes [51].	16
I.13	Installation photovoltaïques raccordées au réseau [51].	16
I.14	Raccordement des onduleurs centralisées.	17
I.15	Raccordement de micro-onduleur	18
I.16	Principe de l'autoconsommation photovoltaïque [8].	20
I.17	Installation photovoltaïque avec auto-consommation direct [6].	20
I.18	Installation photovoltaïque avec revente [6].	21
I.19	Installation photovoltaïque avec stockage batterie [6]	21
II.1	Transformateur abaisseur de tension 230 V / 6 V	26
II.2	Transformateur de courant 100 A / 50 mA	26
II.3	Brochage du module ESP32 Wroom Devkit	27
II.4	Localisation du laboratoires LAT	28
II.5	Panneaux photovoltaïques	28
II.6	Panneaux photovoltaïques + micro onduleur	29
II.7	Routeur photovoltaïque Arsun.	29
II.8	Routeur Shelly EM	30
II.9	Routeur Linky	30
II.10	broches la carte ESP32 WROOM	33
II.11	Test de la réalisation pratique	36
II.12	Test de la réalisation pratique d une charge pc=1	36
II.13	Test de la réalisation pratique d une charge pc=2	37
II.14	Test de la réalisation pratique d une charge 11 lamp	37
II.15	Visualisation des mesures via la page web	38

III.1 Schéma fonctionnel du système proposé . . . . .	42
III.2 capteurjsk.png . . . . .	44
III.3 Principe de mesure avec le capteur JSY-MK-194T . . . . .	45
III.4 Circuit de branchement à l'ESP32 . . . . .	46
III.5 Module gradateur AC Robotdyn . . . . .	46
III.7 Valeur de tension affichée dans le voltmètre . . . . .	47
III.8 Valeur de courant affichée dans l'ampèremètre . . . . .	47
III.9 Charge resistive . . . . .	48
III.10Réalisation pratique . . . . .	48
III.11Routeur photovoltaïque . . . . .	49
III.12Routeur connecter avec des charges supplémentaire . . . . .	49
III.13Écran lcd . . . . .	50
IV.1 Logo logiciel Arduino IDE [10] . . . . .	53
IV.2 Interface Arduino [14]. . . . .	54
IV.3 Configuration de l'IDE avec la carte ESP32 . . . . .	54
IV.4 Périphériques d'nterfaçage avec Wi-Fi [29]. . . . .	57
IV.5 Résultats du code programmé sur Arduino. . . . .	58
IV.6 Résultats des données sur page Web et ecran Lcd 15%. . . . .	58
IV.7 Puissance active et apparent avec une charge de 15%. . . . .	58
IV.8 Résultats des données sur page Web avec charge de 40%. . . . .	59
IV.9 Puissance active et apparent avec une charge de 40%. . . . .	59
IV.10ThingSpeak [26] . . . . .	60
IV.11Création compte sur ThingSpeak [26]. . . . .	61
IV.12Création d'une chaîne sur ThingSpeak . . . . .	61
IV.13Extraire API Key . . . . .	61
IV.14L'interface du chaîne complet sous ThingSpeak . . . . .	61
IV.15Résultats courant et tension avec différents charges jusqu'à 25%. . . . .	63
IV.16Résultats puissance et facteur de puissance avec différents charges jusqu'à 25%. . . . .	63
IV.17Résultats courant et tension avec différents charges jusqu'à 40%. . . . .	64
IV.18Résultats puissance et facteur de puissance avec différents charges jusqu'à 40%. . . . .	64
19 Caractéristiques du transformateur de tension 220V/6V . . . . .	2
20 . . . . .	3
21 . . . . .	4
22 . . . . .	5
23 . . . . .	7
24 . . . . .	8
25 . . . . .	9
26 . . . . .	9

---

## 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
$V_{opt}$	La tension optimale
$I_{opt}$	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	$\phi$	Wb
Induction magnétique	$B$	T
Facteur de puissance	$\cos \varphi$	/
Fréquence	$f$	Hz
Pulsation électrique	$\omega$	rad/s
Pulsation mécanique de rotation	$\Omega$	rad/s
Moment d'un couple	$C$	mN °
Angle (position)	$\theta$	, rad

## Paramètres

Nom	Symbole	Unité
Impédance	$Z$	$\Omega$
Réactance	$X$	$\Omega$
Résistance	$R$	$\Omega$
Inductance	$L$	H
Moment d'inertie	$J$	kg.m <sup>2</sup>
Coefficient de frottement	$f_v$	N.s/rad

---

## Glossaire

Acronyme	Signification
GPV	Générateur Photovoltaïque
PV	Modules photovoltaïque
$I_{sc}$	Courant de court circuit
$V_{oc}$	Tension en circuit ouvert
CS	Convertisseur statique
DC	Direct Current ( Courant Continue
AC	Alternative Current ( Courant Alternatif)
ADC	Convertisseur Analogique-Numrique
DAC	Convertisseur Numrique-Analogique
F.e.m	Force électromotrice
FF	Facteur de forme
$I_{pv}$	Le courant de la cellule
$V_{pv}$	La tension de la cellule
$P_{pv}$	Puissance de la cellule
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PWM	Pulse Width Modulation
STC	Standard Test Conditions
$P_{max}$	Point de puissance maximale
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
IDE	Interactive Developement Environnement
I2C	Inter-Integrated Circuit
I2S	Inter-IC Sound
SPI	Serial Peripheral Interface
SAR	Successive Approximation Register
GPIO	Pins de la carte ESP32
IOT	Internet des objets (Internet of things )
M2M	machine to machine
E/S	entrée/sortie
NOOBS	New Out Of the Box Software

---

# Introduction générale

La transition énergétique mondiale repose aujourd'hui plus que jamais sur le développement et l'intégration massive des énergies renouvelables. Face aux limites des ressources fossiles, à l'augmentation constante de la demande énergétique et à l'urgence climatique, il devient impératif d'exploiter des sources propres, inépuisables et accessibles. L'énergie solaire, et plus particulièrement le photovoltaïque, s'impose comme une solution prometteuse, du fait de sa disponibilité universelle, de son faible impact environnemental et de la maturité croissante des technologies associées.

Le principe de fonctionnement du photovoltaïque repose sur l'effet photoélectrique : lorsqu'un matériau semi-conducteur, tel que le silicium, est exposé à la lumière solaire, il génère un courant électrique. Cette conversion directe de l'énergie lumineuse en électricité est réalisée au niveau des cellules solaires, qui constituent le cœur des panneaux photovoltaïques. Ces systèmes peuvent être déployés de manière centralisée (fermes solaires) ou décentralisée (installations résidentielles ou industrielles).

Toutefois, malgré ses nombreux avantages, l'énergie photovoltaïque présente plusieurs défis. D'une part, sa production est intermittente, car elle dépend des conditions d'ensoleillement. D'autre part, le stockage de l'énergie excédentaire reste coûteux et techniquement complexe. Par ailleurs, l'injection d'électricité dans le réseau pose des problèmes de stabilité et d'équilibre de charge. C'est dans ce cadre qu'émerge le concept d'autoconsommation intelligente, une approche visant à consommer localement l'énergie produite, à optimiser sa gestion et à renforcer l'autonomie énergétique des utilisateurs.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette dynamique et propose la conception et la mise en œuvre d'un système intelligent d'autoconsommation photovoltaïque, capable de mesurer, surveiller et optimiser en temps réel l'utilisation de l'énergie produite. Le cœur du système repose sur un routeur photovoltaïque commandé par une carte ESP32, un microcontrôleur moderne et économique, intégrant des fonctionnalités avancées de communication (Wi-Fi), de traitement et de contrôle.

Le système développé assure :

La mesure précise de la tension et du courant en sortie des panneaux photovoltaïques grâce à des capteurs adaptés.

Le calcul des puissances active et apparente pour suivre les performances énergétiques.

La commande intelligente des charges électriques selon la disponibilité de l'énergie solaire.

L'interfaçage web et cloud, pour visualiser les données à distance, en temps réel, via

une page web locale ou des plateformes en ligne comme ThingSpeak.

Cette solution a pour ambition de répondre aux besoins des sites isolés, des foyers ou installations souhaitant améliorer leur indépendance énergétique, tout en s'appuyant sur des outils technologiques simples, accessibles et évolutifs.

## Chapitre I

# Technologie des systèmes énergétiques photovoltaïques

## I.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque, en tant que conséquence de la conversion directe de la lumière du soleil en électricité, est l'une des sources d'énergie les plus prometteuses, mais aussi les plus durables. Il existe en effet plusieurs types de systèmes énergétiques photovoltaïques qui s'appuient sur l'effet photovoltaïque, découvert au cours du 19<sup>ème</sup> siècle, état du fait que certains matériaux peuvent, se retrouvant sous l'influence conjointe de la lumière, produire un courant électrique. Au cœur des systèmes photovoltaïques se trouvent les cellules solaires qui, comme leur nom l'indique, constituent l'unité de base qui va convertir la lumière en électricité. Généralement fabriquées à partir de semi-conducteurs (exemple le silicium), elles sont exposées au soleil et, lorsqu'elles reçoivent de la lumière, les électrons dans le matériau sont excités, entraînant un courant.

Les avantages de l'énergie photovoltaïque sont assez nombreux, et, à l'instar de sa nature renouvelable, elle permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'assurer la possibilité de recourir à l'électricité dans les zones éloignées. Tout cela dit, on peut encore lui opposer certaines limites d'où des coûts initiaux des investissements sans complètement occulter les problèmes de stockage, de l'énergie électrique et, partant, de l'intermittence de la production de l'énergie d'origine solaire.

## I.2 Etat de l'art des technologies photovoltaïques

La conversion de l'énergie solaire en électricité est au cœur de la technologie photovoltaïque et chaque technologie photovoltaïque repose sur l'élément actif que constituent les cellules photovoltaïques, généralement fabriquées à partir de silicium cristallin qui correspond aux technologies solaires dominantes (technologies multicristallines et monocristallines), mais d'autres technologies plus récentes émergent comme les couches minces CIS et CdTe. Ces nouvelles sortes de technologies permettent aux cellules de capter l'énergie lumineuse et de la transformer en énergie électrique via la manipulation des charges positives et négatives. Quelques dates clés dans l'énergie photovoltaïque

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque, élargi à l'échelle quantique par Albert Einstein

en 1905 (pour cette ampleur, Albert Einstein est prix Nobel de physique[1]

1921 ). 1875 : Werner Von Siemens présente à l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs [45].

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 [54].

En 1958, la première cellule photovoltaïque cumulant un rendement de 9 % permet de faire décoller les premiers satellites alimentés en énergie solaire photovoltaïque[54].

En 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université du Delaware [45] .

En 1983, la première automobile fonctionnant grâce à l'énergie photovoltaïque parcourt 4000 Km en Australie 83 : La première voiture alimentée en énergie photovoltaïque par-

court une distance de 4000 *Km* en Australie [54]. Le progrès des techniques de fabrication des cellules photovoltaïques, conjugué avec les augmentations de volume de production, aboutit, depuis les années 1990, à une baisse des prix. La production des modules se fait en Chine (près de 60 % de la production totale) mais aussi au Japon, aux USA, en Allemagne et en Europe, où de grandes entreprises comme Yingli Green Energy, First Solar et Suntech Power se sont installées. La production mondiale de modules photovoltaïques est passée de 5 MWc en 1982 à plus de 18 GWc en 2013. Pour l'Algérie, le groupe algérien Condor Electronics a mis en production en juillet 2013 des panneaux photovoltaïques d'une puissance allant de 70 W à 285 W à des prix compétitifs [51].

Comme l'indique le programme national algérien des énergies renouvelables, un projet de 400 MW en photovoltaïque a été lancé pouvant s'inscrire dans le programme complémentaire de production de l'électricité, lancé pour l'été 2014, comportant 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 à venir, il est prévu la réalisation d'un parc d'énergies renouvelables de 5539 MW. L'objectif à 2030 est de 12000 MW d'énergies renouvelables pour un approvisionnement interne en électricité. La puissance photovoltaïque installée cumulée dans le monde a atteint 138,9 GW à la fin 2013 [51] . .

### I.2.1 Energie solaire

L'énergie solaire provient du Soleil. Elle joue un rôle essentiel dans de nombreux phénomènes naturels comme la photosynthèse, le vent ou encore le cycle de l'eau. À l'origine, cette énergie est produite par la fusion nucléaire qui se déroule au cœur du Soleil. Elle se propage ensuite dans l'espace sous forme de rayonnement électromagnétique, transportée par des photons de petites particules porteuses d'énergie. Sur Terre, on exploite cette énergie pour produire de l'électricité, notamment grâce aux panneaux photovoltaïques ou aux centrales solaires thermiques. L'un des grands avantages de cette source d'énergie, c'est qu'elle ne génère pas de pollution lors de son utilisation.[39]



FIGURE I.1 – Système solaire photovoltaïque [54]

L'énergie solaire repose sur le principe de l'effet photoélectrique, un phénomène qui permet de générer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette forme d'énergie présente de nombreux avantages : elle est inépuisable, renouvelable et peut être exploitée partout sur un territoire. Les modules photovoltaïques, composés de cellules à base de silicium, sont capables de convertir les photons provenant de la lumière du soleil en électrons. Cette conversion s'effectue au sein de matériaux semi-conducteurs, permettant de produire directement de l'électricité sous forme de courant continu, utilisable pour différents besoins .[54] .

### I.3 Conversion photovoltaïque

Le phénomène photovoltaïque, utilisé dans les panneaux solaires, permet de transformer directement la lumière du soleil en électricité. Cela se fait grâce à un matériau spécial appelé semi-conducteur, qui, sous l'effet de la lumière, génère et déplace des charges électriques positives et négatives. Ce matériau est divisé en deux zones : Une zone "dopée n", qui contient trop d'électrons, Et une zone "dopée p", qui en manque. Quand ces deux zones sont mises en contact, les électrons en trop dans la zone n migrent naturellement vers la zone p. Résultat : la partie n devient chargée positivement (puisque'elle perd des électrons), et la partie p devient chargée négativement (puisque'elle en gagne). Cette séparation de charges crée un champ électrique qui permet de générer un courant quand la lumière frappe la cellule.[51]

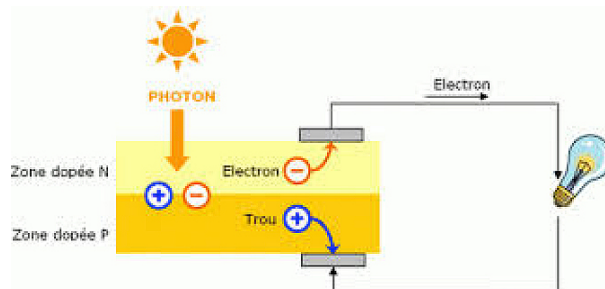


FIGURE I.2 – Principe de la conversion photovoltaïque [51].

La conversion photovoltaïque correspond au processus par lequel l'énergie lumineuse du soleil est transformée en électricité grâce à des cellules photovoltaïques. Voici les grandes lignes de ce fonctionnement [25] :

- Ce principe repose sur l'effet photovoltaïque : il permet de convertir la lumière du soleil en électricité à l'aide de cellules solaires fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs, le plus souvent du silicium.
- Lorsque les photons (les particules de lumière) frappent la cellule photovoltaïque, ils transmettent leur énergie aux électrons du matériau. Ce transfert d'énergie libère les électrons, qui peuvent alors circuler et former un courant électrique.
- Les photons (particules de lumière) pénètrent dans le matériau semi-conducteur de la cellule photovoltaïque et transmettent leur énergie aux électrons. Cela libère les électrons

et crée ce qu'on appelle une "paire électron-trou" (un électron libre et un vide laissé derrière lui). Cette séparation des charges électriques crée une différence de potentiel entre les couches dopées positivement et négativement, ce qui permet de générer un courant électrique.

– La technologie photovoltaïque continue d'évoluer afin d'améliorer le rendement (la quantité d'électricité produite), la durabilité des équipements et la rentabilité globale des installations solaires.

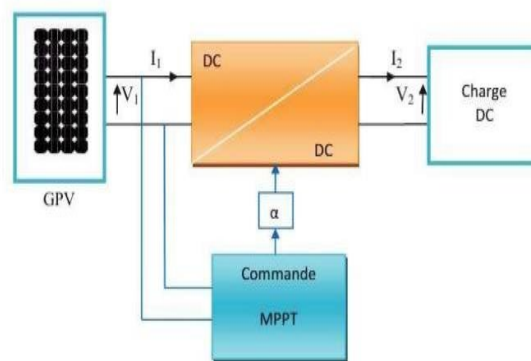


FIGURE I.3 – Chaîne de la conversion photovoltaïque.

### I.3.1 Cellule photovoltaïque

Une cellule solaire photovoltaïque est un dispositif fabriqué à partir d'un matériau semi-conducteur, capable de capter l'énergie lumineuse du soleil et de la convertir directement en courant électrique. Ces matériaux ont la particularité d'absorber certaines radiations, notamment les ultraviolets. Le choix du matériau utilisé dans la fabrication des cellules photovoltaïques dépend de ses propriétés physiques, en particulier de sa capacité à réagir à la lumière solaire, indépendamment de la longueur d'onde des photons.

Lorsque les photons frappent la cellule, ils excitent les électrons du semi-conducteur, créant des charges électriques libres. Ces charges se déplacent à travers le matériau, générant ainsi un courant électrique, généralement de type continu (DC). Les cellules photovoltaïques jouent donc un rôle essentiel dans la production d'électricité à partir de l'énergie solaire.

Les cellules photovoltaïques jouent un rôle crucial dans la production d'électricité à 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 grandes catégories de cellules photovoltaïques à base de silicium (Figure I.5) : les cellules monocristallines, les cellules polycristallines et les cellules en silicium amorphe . [37] :

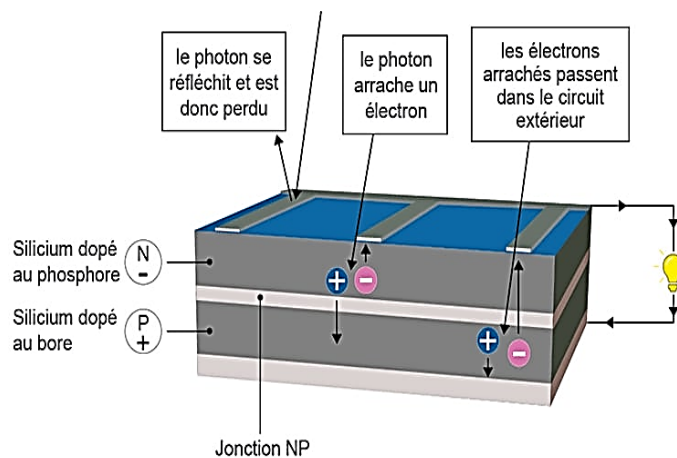


FIGURE I.4 – Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [28].

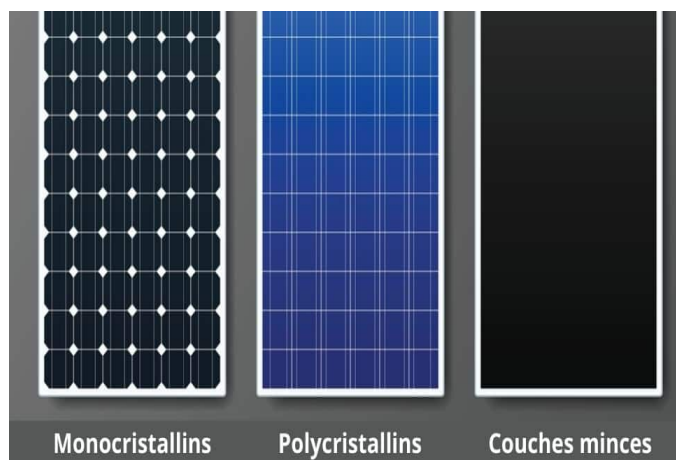


FIGURE I.5 – Types des technologies photovoltaïque

### 1. Monocristallines :

Pour de telles applications techniques, le silicium pur est obtenu par transformation chimique métallurgique à partir du quartz ou de la silice. Le silicium cristallin possède une efficacité électrique et une durée de vie au moins deux fois supérieures aux siliciums amorphes, mais il est beaucoup plus coûteux. Le silicium monocristallin est du silicium dans lequel le réseau cristallin du solide est continu dans l'ensemble du matériau, ne se brisant pas à ses bords et nullement affecté par des limites de grains.

### 2. Polycristallines :

Le silicium polycristallin ou polysilicium est un matériau en verre de silicium mal aligné (polycristallin) : il est un intermédiaire entre le silicium amorphe, dans lequel il n'existe pas d'ordre à longue portée, et le silicium monocristallin. Le silicium polycristallin est un matériau pilotable constitué de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins onéreux que le monocristal. Les cellules carrées ou rectangulaires sont simples à manipuler.

### 3. Amorphes :

Les cellules solaires à films minces constituent une seconde génération de cellules solaires qui consistent à déposer une ou plusieurs couches très minces ou à constituer un film mince (TF) de matériau photovoltaïque sur un substrat, généralement du verre, du plastique ou du métal. La capacité du silicium amorphe à absorber le rayonnement solaire est 100 fois la capacité du silicium cristallin ; les cellules de silicium que l'on obtient sont constituées de couches très fines, d'une épaisseur variant de quelques nanomètres (nm) à plusieurs dizaines de micromètres ( $\mu\text{m}$ ). Ce type est souvent utilisé dans des systèmes photovoltaïques intégrés. Des mises en œuvre commerciales utilisent des panneaux solaires à couches minces en version rigide, intercalés entre deux panneaux de verre dans certaines des plus grandes installations photovoltaïques mondiales.

### I.3.2 Modèles électriques équivalents

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque est constitué d'un générateur de courant qui représente l'éclairement et d'une diode en parallèle qui représente la jonction PN. Mais le schéma équivalent réel n'échappe pas à l'effet résistifs parasites dû à la fabrication qui est représenté sur le schéma équivalent figure(I.6) par deux résistances [51].

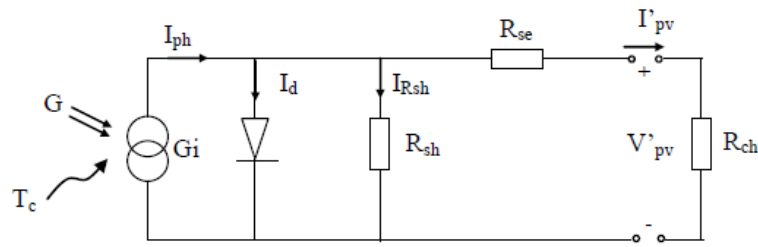


FIGURE I.6 – Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque[51] .

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 :

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

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 [50] . Une cellule solaire est caractérisée par les paramètres fondamentaux suivants [51] :

– Courant de court circuit ( $I_{sc}$ ) : C'est la plus grande valeur du courant générée par une cellule pour une tension nulle ( $V_r = 0$ ).

– 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 ( $I_r = 0$ ). 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  $M(V_{opt}, I_{opt})$  de la figure précédent où la puissance dissipée dans la charge est maximale.

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

Avec :

$V_{opt}$  : La tension optimale.

$I_{opt}$  : Le courant optimale.

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

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

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  $25C$  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 [51].

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

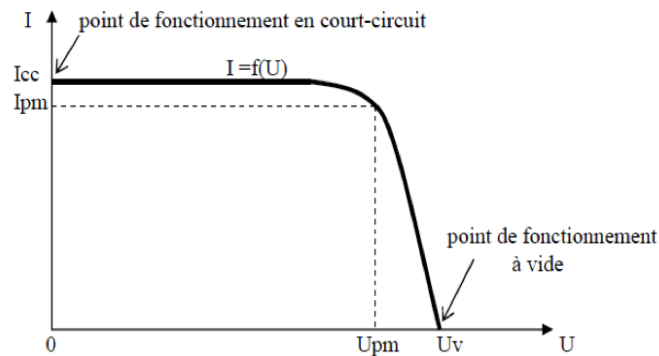


FIGURE I.7 – Courbe courant -tension d'une cellule photovoltaïque [51].

### I.3.3 Panneau photovoltaïque

Pour être plus précis, un panneau photovoltaïque est un assemblage de plusieurs cellules photovoltaïques qui comportent deux couches de matériau semi-conducteur : la couche P est dopée positivement, alors que la couche N est dopée négativement. Ce sont des jonctions PN. C'est lorsque l'on arrache un électron que le « trou » qui reste se comporte comme une charge positive. Ces cellules photovoltaïques sont généralement en silicium, lequel permet de convertir la lumière du soleil en électricité. Ces cellules transforment directement la lumière en électricité grâce à l'effet photoélectrique. En définitive, le panneau photovoltaïque est un dispositif permettant de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire en captant les photons présents dans la lumière du soleil et en les transformant en courant électrique [5, 9].

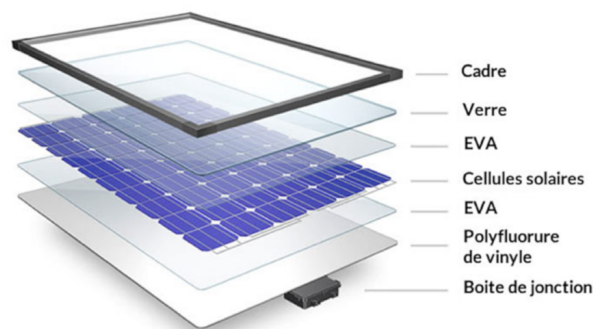


FIGURE I.8 – Composition d'un panneau photovoltaïque [19]

### 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 [7]

. – 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 [22].

– 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 % [19].

– 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  $/(\text{m}^2)$  varie peu d'un modèle à un autre [19]. .

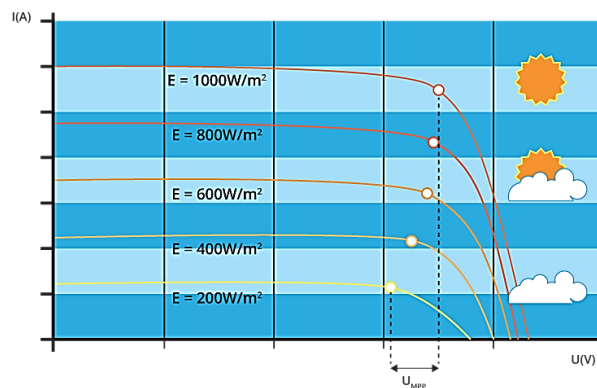


FIGURE I.9 – Courbe courant-tension d'un panneau photovoltaïque change en fonction de l'insolation[19].

### I.3.5 Fonction MPPT

La recherche du point de puissance maximum (Maximum Power Point Tracking, MPPT) représente une étape précieuse du système photovoltaïque. Depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce type, plusieurs techniques ont ainsi vu le jour adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient en très nombreuses caractéristiques, tel le degré de complexité, tant qu'à l'instar du nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, le coût, le rendement et le domaine d'application [36].

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une commande fondamentale au bon fonctionnement du système photovoltaïque. Le principe de ces commandes est de rechercher le point de puissance pouvant être sortie maximal (MPPT) tout en assurant de façon optimale le couplage entre le générateur et la charge pour obtenir le maximum de puissance fournie [38].

La caractéristique I-V de la cellule solaire n'est pas linéaire mais dépend de l'éclairement, donc de la température. Il y a un point de la courbe P-V, I-V on appelle le point de puissance maximum ce point n'est pas connu mais peut s'évaluer [38].

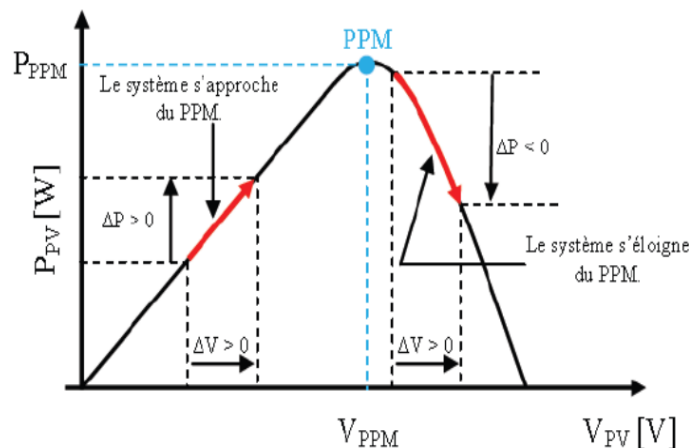


FIGURE I.10 – Présentation du point maximale [38] .

La qualité de la stratégie de commande du MPPT peut alors se définir comme la position du point de fonctionnement du système par rapport au PPM, la puissance effectivement  $P$  délivrée par le GPV dépendant elle de la commande au niveau du convertisseur, le rendement du point de fonctionnement qui en découle et que nous noterons MPPT, permet de mesurer l'efficacité de la commande, ou encore en résumé, le de perte de puissance d'un module PV par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait fournir. [38]

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

Le seul paramètre MPPT n'est pas suffisant pour qualifier la performance d'une commande MPPT. En outre, d'autres critères (temps de réponse, capacité à fonctionner sur une large plage de puissance, etc.) viennent s'ajouter à l'appréciation de la qualité des commandes MPPT que l'on présentera dans la suite [38].

- **Simplicité et coût**

La complexité de l'algorithme implique des difficultés d'implantation et éventuellement des pertes qui sont directement liées au nombre de calculs à effectuer. En somme, pour qu'une commande MPPT soit pertinente vis-à-vis du surcoût généré, elle doit avoir une certaine simplicité favorisant une faible consommation donc un coût de développement raisonnable.

- **Réponse dynamique**

Une bonne réponse dynamique d'une commande MPPT est nécessaire pour piloter l'étage d'adaptation mais aussi pour garantir que la recherche du nouveau PPM suite à des changements d'éclairement ou de température soit la plus rapide possible.

- **Flexibilité**

Une commande MPPT doit fonctionner avec précision et stabilité quelles que soient les conditions d'utilisation, c'est-à-dire être fiabilisée pour fonctionner sur tous les types de panneaux.

% Elle doit être la plus universelle possible, capable de fonctionner avec des panneaux des différentes technologies sans trop de modifications, tout en gardant le même taux de précision et de robustesse.

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

La commande MPPT, étant par définition celle qui a pour mission d'atteindre le PPM de la puissance délivrée par un module PV dans une application photovoltaïque, doit fonctionner, quel que soit le niveau d'ensoleillement. Elle est dite compétitive lorsqu'elle permet d'atteindre le PPM avec une erreur statique correspondant à la position du point de fonctionnement par rapport au PPM à faible et stricte sur une large gamme de puissance.

## I.4 Classification des systèmes photovoltaïque

On trouve d'ordinaire trois variantes de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes raccordés au réseau ou simplement connectés, et les systèmes hybrides. Dans le reste du chapitre, nous examinerons plus particulièrement les fonctions et les topologies des deux premiers.[51]

### I.4.1 Rendement des systèmes photovoltaïques

Le rendement d'un panneau solaire est le rapport entre l'énergie lumineuse transformée en électricité et l'énergie qui est entrée dans le panneau. Il s'exprime en pourcentage.[27]

Un rendement d'installation élevé va donc de pair avec un projet photovoltaïque plus rentable, car il signifie moins de pertes et donc plus d'électricité générée pour une quantité de soleil emmagasinée.[27]

En général, les panneaux photovoltaïques affichent des rendements de 15% à 22% c'est-à-dire qu'ils sont capables de transformer entre 15% et 22% de l'énergie solaire qui les traverse en électricité exploitable. Toutefois, le rendement global du système photovoltaïque est souvent inférieur, en raison des pertes, par exemple, dues à la conversion du courant, au rayonnement, à l'ombrage, aux pertes de câblage, etc.[24]

Le rendement d'un système photovoltaïque se décompose en différentes composantes, chacune contribue à la performance du système, voici un détail de ces composantes [52, 2] :

1. Rendement des panneaux solaires : Il s'apprécie par la capacité des panneaux solaires à transformer l'énergie de la lumière du soleil en électricité. Les modèles modernes offrent généralement un rendement de 15 % à 22% ; certains modèles, vont au-delà.
2. Rendement de l'onduleur :La plupart du temps, l'électricité délivrée par les panneaux photovoltaïques a la forme d'un courant de type continu (CC), alors que la plupart des appareils électriques sont alimentés par un courant alternatif (CA). Le rendement de l'onduleur est le facteur qui évalue l'efficacité du processus de conversion et il dépend du type d'onduleur utilisé. Les onduleurs modernes ont généralement 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 posés et exploités afin de maximiser la capture de l'énergie solaire. Cela comprend des critères comme l'orientation des panneaux par rapport au soleil, l'inclinaison des panneaux, l'ombrage, la propreté des panneaux, etc.
4. Pertes électriques : Des pertes électriques liées au système photovoltaïque sont souvent rencontrées, en particulier des pertes de câbles, des pertes sur les connexions, des pertes sur la 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 mis en œuvre de façon à pouvoir fonctionner en autonomie sans aucune autre source d'énergie. Généralement, ces systèmes sont à destination de régions isolées et éloignées du réseau. Ces systèmes se composent de quatre éléments principaux :

- On a des panneaux solaires, ayant pour rôle de fournir de l'énergie à la charge, et à la batterie.
- On a des batteries, ayant pour rôle de stocker l'énergie, puis de la récupérer quand l'ensoleillement est insuffisant.
- On a un régulateur ayant pour rôle de réguler la charge, et la décharge de la batterie.
- On a un onduleur ayant pour rôle d'assurer la conversion (DC-AC). Il assure que l'alimentation AC soit fournie à partir du DC au récepteur.

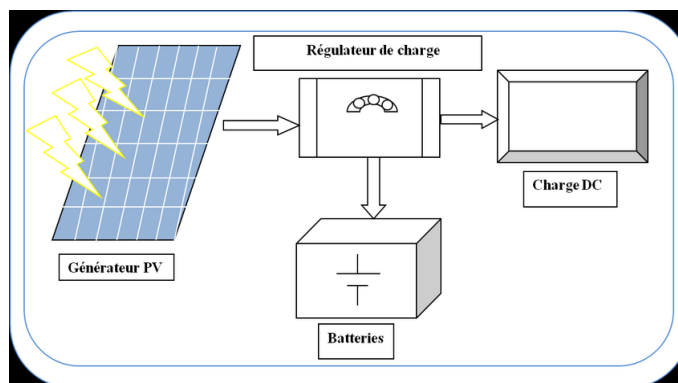


FIGURE I.11 – Système photovoltaïque autonome en site isolé

À la figure I.12, plusieurs types de systèmes photovoltaïques autonomes sont présentés qui montrent les diverses solutions réalisables : couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT, voire fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique [?].

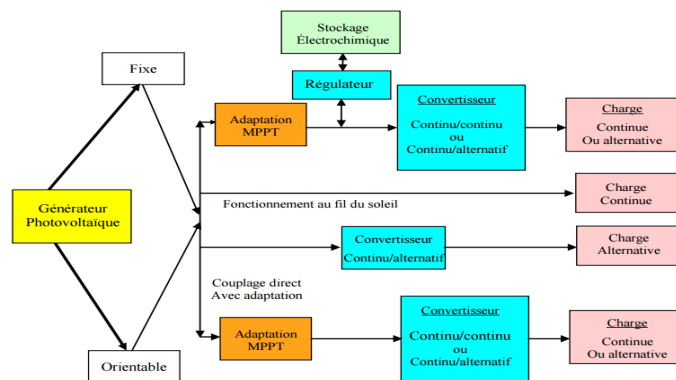


FIGURE I.12 – Différents types des systèmes photovoltaïques autonomes [51].

### I.4.3 Systèmes PV raccordés au réseau

Les systèmes raccordés au réseau est un formes d'organisation résultant des efforts de décentralisation de plus en plus affirmés des réseaux électriques. Produire de l'électricité plus près du lieu de consommation, c'est produire son électricité propre, qui est injectée dans le réseau quand il y a un excédent de production, le réseau fournissant au besoin pour équiper l'utilisateur, ce qui évite d'avoir à acheter et maintenir des batteries. Dans le cas de l'installation, le réseau électrique national se transforme en un réservoir sans fin de stockage dans lequel l'énergie renouvelable est injectée lorsqu'elle est produite par l'installation et pas consommée par l'utilisateur, et d'où l'électricité est extraite au moment où elle est nécessaire, lorsque l'installation ne produit pas (la nuit) [15]

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

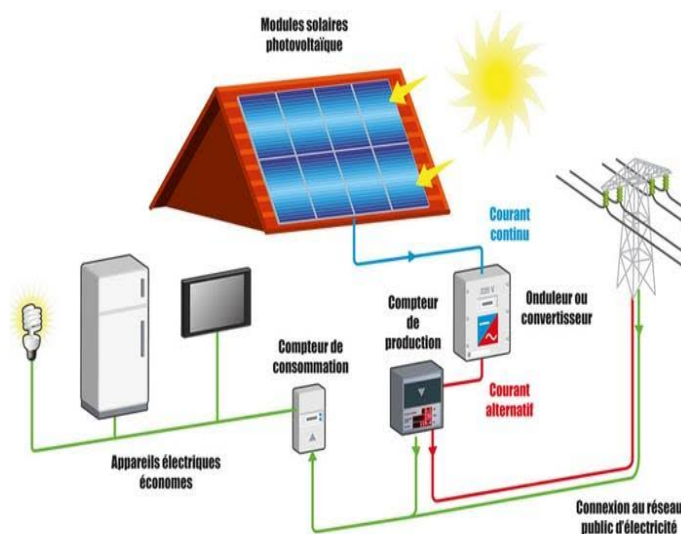


FIGURE I.13 – Installation photovoltaïques raccordées au réseau [51].

Cette installation fonctionne selon la logique suivante[15] :

- Le générateur photovoltaïque est touché par le rayonnement solaire.
- L'onduleur transforme des énergies continues en énergies alternatives.
- L'énergie produite est utilisée immédiatement si l'utilisateur en a besoin ou injectée en réseau d'où il peut également se servir si besoin.
- Ainsi, dans ce système, le compteur de production comptera l'énergie produite et consommée instantanément par l'utilisateur alors que le compteur d'échange lui comptera l'énergie consommée par l'utilisateur en prenant sur le réseau.

## I.5 Onduleurs centralisées et micro-onduleurs

Les onduleurs centralisés d'une part, et les micro-onduleurs d'autre part, constituent deux technologies distinctes de conversion de l'énergie solaire produite par des panneaux photovoltaïques qui génère de l'électricité continue en énergie alternative appropriée et propre pour le réseau électrique. C'est ce que nous allons pouvoir étudier plus en détail ci-après à travers leurs avantages/ inconvénients et spécificités techniques.

### I.5.1 Onduleurs centralisées

Quelque peu technique mais très particulier, l'inverseur centralisé est l'appareil fonctionnant en tant qu'interface entre un réseau et plusieurs modules photovoltaïques (PV) de puissance très variée. Les modules photovoltaïques ont été reliés en branchements raccordements, pour qu'ils soient chacun en connexion en série (au moyen de coupleurs), générant ainsi des tensions assez élevées dans chaque connexion en série. ces modules photovoltaïques sont ensuite reliés entre eux en connexion en parallèle, pour ce qui est de manière à atteindre de grands niveaux de courants et des puissances qui peuvent aller de 10kW à 750kW.[48].

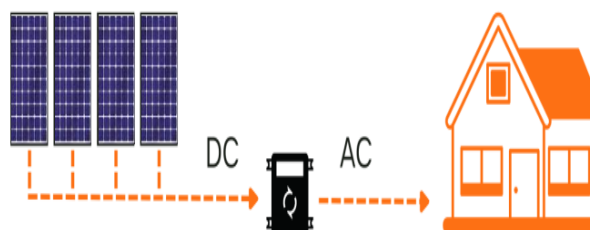


FIGURE I.14 – Raccordement des onduleurs centralisés.

### I.5.2 Micro-onduleurs

Un micro-onduleur est un convertisseur solaire fit à des panneaux photovoltaïques pris individuellement. Il est directement connecté à l'arrière de ceux-ci. Cela permet à chaque panneau solaire d'être branché sur son propre onduleur et d'optimiser ainsi la production d'énergie. La surveillance s'en trouve simplifiée, la recherche d'éventuels problèmes facilitée,

et une durée de vie supérieure à 20 ans est même constatée. En outre, la production d'électricité est plus stable (même si un panneau est à l'ombre) et un dysfonctionnement sur un seul panneau n'entraîne pas une diminution de la production totale aussi importante.[23, 21].

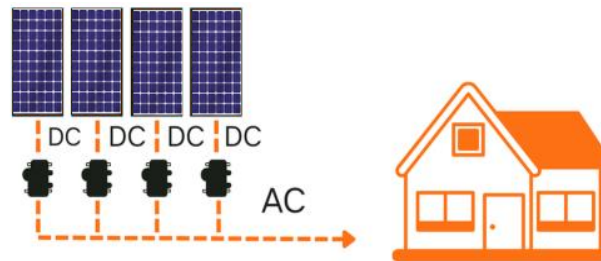


FIGURE I.15 – Raccordement de micro-onduleur .

### I.5.3 Différence entre onduleurs et micro-onduleurs

Les micro-onduleurs sont installés individuellement sur chaque panneau, d'où un coût supérieur mais une meilleure pérennité : la durée de vie est de 20 à 25 ans. En outre, chaque panneau peut ainsi être mieux optimisé puisque ces derniers ne sont pas interdépendants. Les micro-onduleurs bénéficient aussi de l'argumentation sécuritaire. Comme le format est réduit par rapport aux onduleurs centraux, la tension stockée est plus basse, limitant ainsi le risque d'arc électrique ou de départ de feu. Il est également possible de suivre à distance et plus vite la production d'électricité pendant la phase d'opération grâce au boîtier de gestion (braçage en temps réel). Le dispositif centralisé est quant à lui un unique onduleur qui gère de manière séquentielle l'ensemble des panneaux solaires d'une installation. Le coût est très inférieur et la durée de vie est inférieure (10 ans en moyenne par un défaut habituel). Mais lorsque un panneau ne fonctionne plus, c'est toute l'installation qui ne produit plus d'électricité, ce qui limite le diagnostic de la panne et la production ? de l'ensemble de l'installation.

Pour résumer, les onduleurs centraux sont moins coûteux à l'achat mais moins performants en termes de longévité et de gestion des pannes individuelles, alors que les micro-onduleurs réalisent une production d'électricité plus fiable, une meilleure supervision, et ont une durée de vie plus prolongée, même si leur coût de départ est plus élevé.

## I.6 Autoconsommation énergétiques

Autoconsommation est la production et la consommation directe, par les particuliers, de leur propre énergie au moyen de ce que la nature offre, notamment la chaleur, le vent et le soleil et avec le concours d'équipements tels que les panneaux photovoltaïques, éoliennes, etc. Cette solution permet d'alléger leur facture d'électricité en autoconsommant une partie de l'énergie produite et permet également d'assurer une certaine autonomie énergétique [46].

### I.6.1 Définition d'autoconsommation photovoltaïque

L'autoconsommation photovoltaïque est un principe qui pose qu'un individu ou un collectif produit de l'électricité à partir de panneaux solaires photovoltaïques et consomme l'électricité ainsi produite au lieu de l'acheter à des fournisseurs traditionnels pour son propre usage énergétique. Elle permet de réduire ses besoins en électricité fournie par les distributeurs et offre, au moins en partie, une autonomie énergétique. La valorisation d'une ressource renouvelable à travers un dispositif d'autoconsommation permet de participer à la transition énergétique en rendant l'usage de l'électricité moins impactant sur l'environnement [47].

### I.6.2 Différent types d'autoconsommation

L'autoconsommation photovoltaïque partielle est le fait de produire une partie de l'électricité à l'aide de panneaux photovoltaïques 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 pour les autres consommateurs. Au-delà de

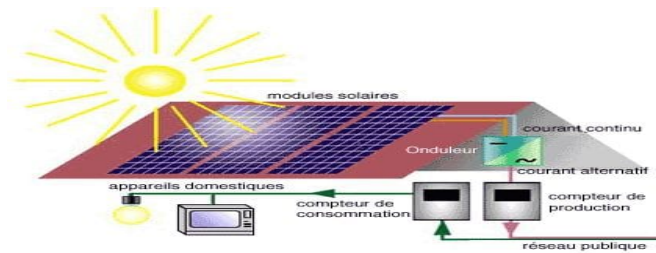


FIGURE I.16 – Principe de l'autoconsommation photovoltaïque [8].

l'aspect économique il existe plusieurs architectures matérielles suivant l'utilisation que l'on veut en faire, ces dernières sont différentes entre elles au final.

### I.6.2-a Direct

L'auto-consommation directe est une forme d'auto-consommation en continu qui consiste à consommer en temps réel l'électricité produite par les panneaux photovoltaïques. Dans ce cas l'électricité fournie par les panneaux solaires est consommée sur le lieu de production et ne se retrouve donc pas sur le réseau public pour générer des revenus, mais est utilisée pour satisfaire une partie de la consommation publique [35].

Les infrastructures d'autoconsommation directe peuvent être mises en place dans les lieux d'habitat tels que les logements particuliers et les bureaux ou locaux commerciaux et se composent habituellement d'une suite de panneaux photovoltaïques, d'une batterie de stockage, d'un onduleur et d'un compteur mesurant la quantité d'énergie puisée dans le réseau [35].

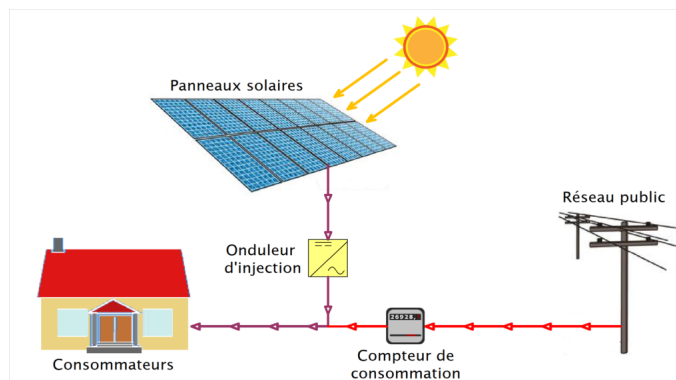


FIGURE I.17 – Installation photovoltaïque avec auto-consommation direct [6].

### I.6.2-b Avec revente

L'autoconsommation avec revente est la production d'énergie électrique à l'aide de panneaux photovoltaïques, qui satisfera les besoins de la consommation et l'excédent est revendu. Ce dispositif permet de réduire la facture d'électricité, mais aussi d'être fournisseur, et d'éviter l'injection gratuite dans le réseau de l'énergie excédentaire. L'autoconsommation avec revente vise à équilibrer l'énergie utilisée

et l'excédent à gérer au mieux afin d'optimiser les bénéfices écologiques et économiques.

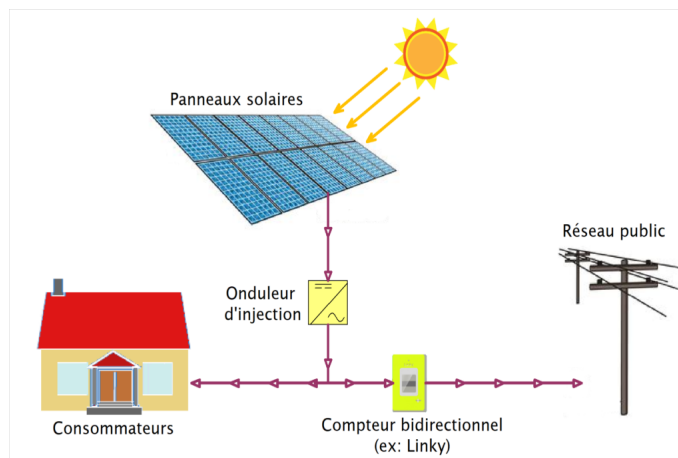


FIGURE I.18 – Installation photovoltaïque avec revente [6].

### I.6.2-c Avec stockage

Toujours dans le même principe de limitation d'intégrer le surplus de production gratuitement dans le réseau. L'autoconsommation avec stockage est l'une des solutions permettant aux consommateurs de produire leur propre énergie et de stocker le surplus pour le consommer ultérieurement. Cette solution n'est envisageable qu'avec l'appui d'une batterie de stockage, ces installations étant la solution d'énergie durable et puissante disponible dans le marché permettant le taux d'autoconsommation élevé de cette solution et garantissant un approvisionnement électrique continu en cas d'interruption des services électriques [13].

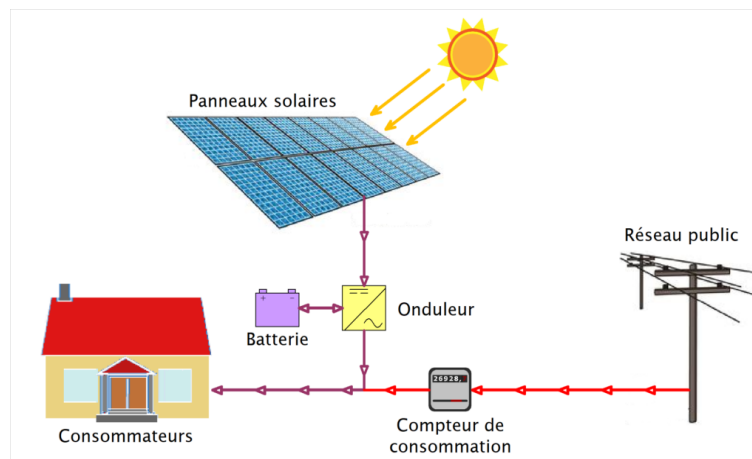


FIGURE I.19 – Installation photovoltaïque avec stockage batterie [6]

### I.6.3 Avantages d'autoconsommation

- Réduction de la facture d'électricité : En produisant de l'électricité pour couvrir une partie de ses besoins, l'autoconsommation permet de réduire la dépendance énergétique et donc, de faire baisser la facture d'électricité.
- Autonomie énergétique : En produisant son électricité, on parvient à atteindre une autonomie vis-à-vis des fournisseurs d'énergie.
- Économies d'énergie : En utilisant en local l'électricité que l'on produit soi-même, il est possible de réaliser d'importantes économies sur les factures d'énergie, tout en se mettant à l'abri des augmentations des tarifs de l'électricité.
- Faire appel à une source d'énergie inépuisable qu'est le soleil, nous permet de consommer une électricité verte.
- Valorisation de l'énergie produite en surplus : consiste à revendre l'électricité surproduite, donnant le choix entre obtenir des prix d'achat intéressants ou de la stocker pour un usage ultérieur selon ses besoins.
- Et un certain niveau de garantie et de durabilité, les panneaux solaires bénéficient de garanties qui peuvent atteindre 25 ans, concédant à un système une garantie de durée d'usage et de performance.

## I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, il a été question du processus de conversion de l'énergie solaire en électricité. L'analyse des différents types de cellules photovoltaïques et de leurs équivalents a révélé la pluralité et la complexité de cette technologie. Nous avons ensuite classé les systèmes photovoltaïques selon leur rendement, leurs usages et leur architecture. Ont été comparés les onduleurs centralisés et les micro-onduleurs et les performances énergétiques ou d'efficacité ont été évaluées, afin de faire ressortir la nécessité de choisir une technologie appropriée. La définition de l'autoconsommation photovoltaïque et de ses différents types a permis de mettre leurs atouts en lumière. /

En résumé, la technologie photovoltaïque possède un potentiel très intéressant destiné à satisfaire les besoins énergétiques de la société tout en réduisant l'empreinte environnementale.

## Chapitre II

# principe et réalisation matérielle du système photovoltaïque

## Introduction

Dans un contexte mondial où l'accès à l'énergie et la connectivité constituent des enjeux cruciaux, les technologies reposant sur les énergies renouvelables, telles que les systèmes solaires autonomes, suscitent un intérêt croissant. Parmi celles-ci, les routeurs solaires représentent une solution innovante pour fournir un accès à Internet dans des zones isolées ou non desservies par un réseau électrique conventionnel. Afin d'optimiser leur fonctionnement, il est essentiel de surveiller en temps réel la puissance produite par les panneaux solaires associés. Cette surveillance permet non seulement de garantir une exploitation énergétique efficace, mais également d'anticiper d'éventuelles anomalies de fonctionnement.

Dans ce contexte, l'ESP32, un microcontrôleur à faible coût doté de capacités de connectivité Wi-Fi et de traitement numérique avancées, constitue un outil particulièrement adapté. Ce travail propose la conception et la mise en œuvre d'un système de mesure de la puissance solaire basé sur un ESP32, permettant l'acquisition de données électriques (tension et courant), leur traitement pour le calcul de la puissance, ainsi que leur affichage en temps réel via une interface Web embarquée. Cette dernière est accessible depuis tout appareil connecté à un réseau local, offrant ainsi à l'utilisateur une visualisation simple, intuitive et continue des performances du routeur solaire.

Ce chapitre présentera les spécificités techniques du projet, les composants utilisés, ainsi que l'architecture logicielle et matérielle mise en place pour atteindre les objectifs définis.

## Cahier des charges

### 1. Objectifs du projet

- Mettre en place un système embarqué pour la mesure de la puissance générée par des panneaux solaires alimentant un routeur.
- Afficher en temps réel les mesures de tension, courant et puissance via un serveur Web intégré à l'ESP32.
- Fournir à l'utilisateur un accès distant à ces données à travers un navigateur Web.

### 2. Spécifications techniques

- Utilisation d'un microcontrôleur ESP32 pour l'acquisition des signaux analogiques de tension et de courant.
- Intégration de capteurs adaptés pour une mesure précise des grandeurs électriques.
- Implémentation d'un algorithme de calcul de la puissance électrique instantanée  $P = U \times I$ .
- Développement d'un serveur Web embarqué sur l'ESP32 pour l'affichage des données.
- Conception d'une interface utilisateur sobre et ergonomique.

### 3. Fonctionnalités attendues

- Mesure en temps réel de la tension et du courant.

- Calcul et affichage de la puissance instantanée générée.
- Actualisation régulière des données sur l'interface Web.
- Paramétrage de seuils critiques pour générer des alertes.
- Compatibilité avec les principaux navigateurs Web.

#### 4. Contraintes

- Alimentation autonome du système via les panneaux solaires et une batterie tampon.
- Choix de capteurs en adéquation avec les niveaux électriques des panneaux solaires.
- Respect des normes de sécurité dans le câblage et la manipulation des composants électroniques.

#### 5. Livrables attendus

- Schéma électrique complet du montage.
- Code source du programme développé sur l'ESP32.
- Interface Web fonctionnelle pour l'affichage des mesures.
- Documentation technique détaillée : guide d'installation, configuration et exploitation du système.

## II.1 Structure et fonctionnalités du système de mesure de puissance

La puissance apparente, exprimée en voltampères (VA), est déterminée par le produit de la tension  $U$  par le courant  $I$ , selon la relation suivante :

$$P = U \times I \tag{II.1}$$

Afin de mesurer les grandeurs électriques d'un réseau domestique, il est nécessaire d'adapter les signaux à des niveaux compatibles avec les dispositifs électroniques de traitement.

### II.1.1 Mesure de la tension

La mesure de la tension secteur (230 V) est réalisée à l'aide d'un **transformateur abaisseur de tension**, permettant de réduire la tension alternative à une valeur plus faible, typiquement 6 V. Ce type de transformateur permet également un isolement galvanique entre le réseau électrique et le circuit de mesure, ce qui constitue un élément de sécurité essentiel.



FIGURE II.1 – Transformateur abaisseur de tension 230 V / 6 V

### II.1.2 Mesure du courant

Pour la mesure du courant, on utilise une **pince ampèremétrique** de type transformateur de courant. Par exemple, un modèle 100 A / 50 mA permet de mesurer un courant passant dans un conducteur (phase) en produisant un courant secondaire proportionnel, exploitable par le microcontrôleur.

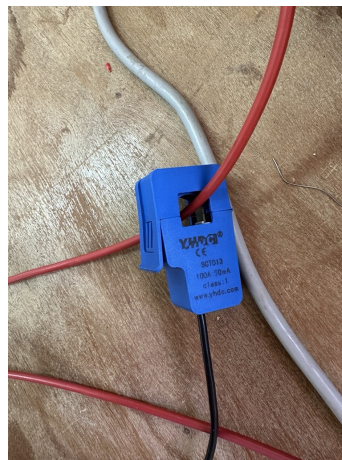


FIGURE II.2 – Transformateur de courant 100 A / 50 mA

### II.1.3 Unité de traitement : ESP32

Le traitement des signaux analogiques est confié à un microcontrôleur **ESP32**. Ce dernier est doté d'un convertisseur analogique-numérique (CAN) sur 12 bits, offrant une résolution suffisante pour la mesure des signaux de tension et de courant. De plus, l'ESP32 dispose de capacités de communication Wi-Fi, ce qui permet de déployer un **serveur web embarqué**. Ce serveur rend les données mesurées accessibles en temps réel à partir d'un smartphone, d'une tablette ou d'un ordinateur via un navigateur web.



FIGURE II.3 – Brochage du module ESP32 Wroom Devkit

#### II.1.4 Commande par relais

Une fonctionnalité complémentaire du système est la **commande de relais**. En cas de surproduction d'énergie (par exemple dans un système photovoltaïque), il est pertinent d'activer un relais afin de connecter une charge supplémentaire et consommer l'excès de production. Cela permet d'éviter des surtensions ou des pertes d'énergie, tout en améliorant la gestion énergétique du système.

## 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)

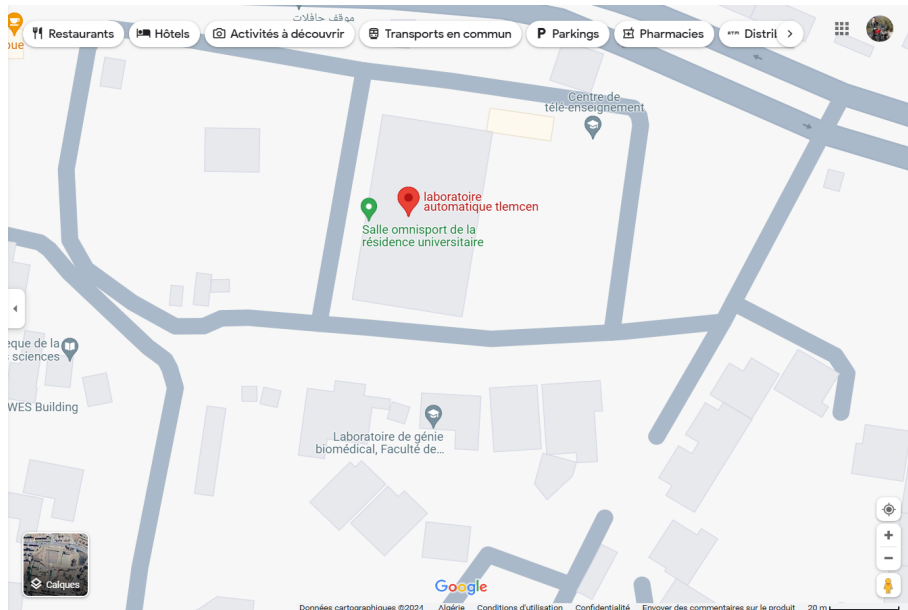


FIGURE II.4 – Localisation du laboratoires LAT

### II.2.2 Présentation de la microcentrale PV existante

Notre installation présente une micro centrale photovoltaïque qui, avec ses six panneaux solaires, a la possibilité de capturer une puissance électrique d'environ 1.5 kW (puissance maximum de chaque panneaux est 250 W) dans les meilleures conditions d'ensoleillement.



FIGURE II.5 – 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.

### II.2.3 Exemples de routeur photovoltaïque

Il n'est pas difficile d'énumérer quelques exemples de routeurs solaires dotés de diverses caractéristiques et capacités de gestion de l'énergie solaire excédentaire, permettant ainsi de recharger les appareils tels que les chauffe-eau en utilisant le surplus d'énergie solaire, contribuant ainsi à une meilleure efficacité énergétique dans le cadre d'un foyer. Voici



FIGURE II.6 – Panneaux photovoltaïques + micro onduleur

ci-après quelques réalisations du routeur photovoltaïque.

### II.2.3-a Routeur photovoltaïque Arsun

Le routeur solaire Arsun est un dispositif qui vise à exploiter, de manière autonome, la surproduction photovoltaïque afin d'accroître l'autoconsommation d'électricité solaire et ainsi réduire la dépendance au réseau public et le coût de l'énergie. C'est donc un système permettant le réglage de l'énergie excédentaire, pour le cas des utilisateurs de chauffe-eaux électriques ou de systèmes de chauffage dit traditionnels alimentés avec une résistance. Le principe de fonctionnement du routeur est simple, lorsqu'il y a surplus, le routeur solaire Arsun va automatiquement diriger cette surproduction vers une charge résistive, par exemple un chauffe-eau électrique, pour l'utiliser immédiatement et efficacement. Cela optimise ainsi l'autoconsommation de l'énergie solaire produite. [44].



FIGURE II.7 – Routeur photovoltaïque Arsun.

### II.2.3-b Routeur photovoltaïque Shelly EM

Le routeur solaire Shelly EM se signale et se spécifie car il constitue un choix économique et plutôt facile d'accès pour la gestion de l'énergie photovoltaïque produite par sa propre installation photovoltaïque qu'elle soit existante ou installée avec le Shelly EM. À la fois en monophasé et en triphasé, le module Shelly Em est tout en mesure multi Source fonctionne très simplement pour mesurer la puissance et le sens de ce transfert, à savoir dans quelles conditions, la puissance de l'énergie photovoltaïque est réinjectée. On peut effectivement en recueillir les données en temps réel, plusieurs fois par seconde, par Wifi.[33].

Le dispositif Shelly Em est constitué de deux canaux. Le premier est réservé à la mesure

de la puissance en amont du disjoncteur principal, alors que le second peut être affecté à la mesure d'un consommateur particulier ou bien à la mesure de la production photovoltaïque, sans affecter la fonction du routeur[33].



FIGURE II.8 – Routeur Shelly EM

### II.2.3-c Routeur décodant le Linky

Ce routeur utilise un triac pour contrôler la surpuissance et est compatible avec les systèmes monophasés et triphasés. Il peut être intégré à un système Linky pour améliorer la production d'énergie et le suivi et le contrôle de la consommation. Les valeurs peuvent être extraites via une connexion série au microcontrôleur ESP32 en se connectant au TIC (Client Télé-Information).[32].

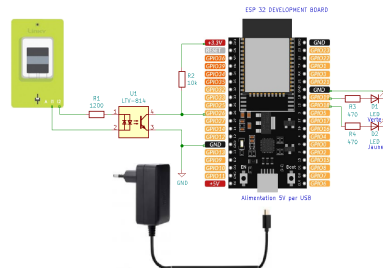


FIGURE II.9 – Routeur Linky

### II.2.4 Cahier des charges

Ce projet comprend l'installation d'un système de mesure de l'énergie solaire à l'aide d'un microcontrôleur ESP32. Ce système permet de collecter les données de tension et de courant des panneaux solaires, de calculer la puissance produite et d'afficher ces données sur une interface web à l'aide d'un navigateur.

#### 1. Objectifs :

- Créez un système utilisant un ESP32 pour mesurer la puissance produite par les panneaux solaires en temps réel et analyser les données.
- Mesurez la tension, le courant et la puissance en temps réel sur un serveur web connecté à l'ESP32.
- Surveillez les performances du système solaire via un navigateur 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".
- Servveillance 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 Module de développement ESP32

L'ESP32 est le nom d'un microcontrôleur développé par Espressif Systems, une entreprise chinoise située à Shanghai. Basé sur l'architecture Xtensa LX6 de Tensilica, ce microcontrôleur combine un Wi-Fi intégré et un Bluetooth en mode dual, ce qui lui permet de servir de pont entre les microcontrôleurs classiques et les réseaux sans fil.

Il est largement utilisé dans le domaine de l'Internet des Objets (IoT) et les applications embarquées grâce à ses capacités avancées de connectivité. Sa production en volume n'a commencé qu'à la fin de l'année 2016. Depuis sa commercialisation, les fabricants tiers l'ont rapidement adopté pour concevoir des systèmes innovants.

Il existe plusieurs modèles d'ESP32, avec des tailles différentes, mais ils restent identiques du point de vue programmation. Adapté aux développeurs utilisant des langages comme le C, C++, Python ou MicroPython, il offre une grande flexibilité.[43].

### II.3.1 Description de la carte ESP32 WROOM

L'ESP32-WROOM-32 est un module puissant de la famille des ESP doté de capacités Wi-Fi et Bluetooth intégrées. Caractérisé par 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 restant économe en énergie.

**Il dispose de :**

- 4 Mo de mémoire flash intégrée pour le stockage des programmes et données.
- 520 Ko de RAM pour l'exécution des programmes

**Connectivité sans fil :**

- Wi-Fi 802.11 b/g/n/e/i (2,4 GHz) avec débits jusqu'à 150 Mbps.
- Bluetooth v4.2 supportant BR/EDR et BLE.

**Interfaces disponibles :**

- SPI, I2C, I2S.
- PWM, ADC, DAC.[16].

### II.3.2 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[16].

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
Pinces 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.3.3 Broches la carte ESP32 WROOM

Il existe de nombreux types de cartes ESP32 de format également varié et le brochage sera différent pour chaque carte. En matière de pin GPIO, même si toutes les broches du microcontrôleur ESP32 ne sont pas disponibles sur une carte de développement car certaines d'entre elles peuvent être entièrement dédiées en permanence à une fonction cela nécessite de bien connaître les limitations de certaines broches GPIO de l'ESP32 afin d'éviter des déconvenues dans nos projets ou des erreurs mystérieuses dans nos programmes.[42].

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

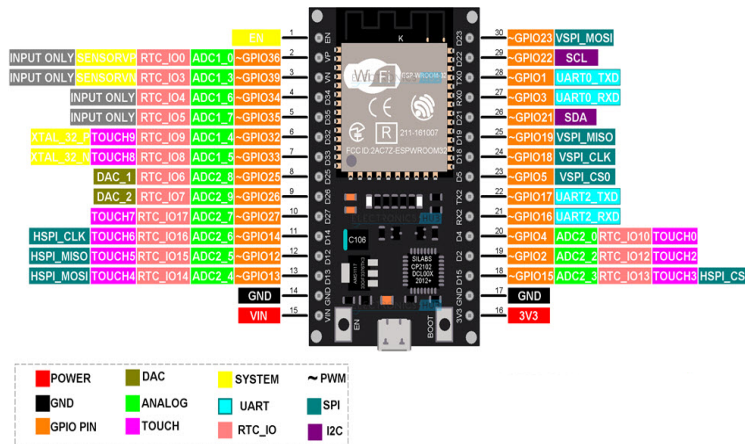


FIGURE II.10 – broches la carte ESP32 WROOM

Esp32 WROOM ci-dessus se compose de 30 broches GPIO et chacune capable d'assumer plusieurs fonctions (une seule activée à la fois). Il est possible de définir une broche comme GPIO, ADC ou UART dans le programme[53].

### II.3.4 Convertisseur Analogique-Numérique (ADC)

Les convertisseurs analogique-numérique constituent des composants matériels essentiels permettant à tout microcontrôleur de transformer des signaux analogiques en données numériques dont le système peut tirer parti. Ils sont donc chargés de permettre au microcontrôleur de mesurer, par exemple, des grandeurs physiques (généralement analogiques) telles que la température, la luminosité ou tout capteur analogique de l'environnement immédiat. L'ESP32 wroom comprend deux convertisseurs analogique-numérique (ADC) SAR (Successive Approximation Register) de 12 bits chacun, lesquels peuvent fournir au total 15 canaux de mesure (broches analogiques activées). ADC1 (6 canaux, attachés aux GPIO 32 - 39) et ADC2 (9 canaux, attachés aux GPIO 02, 04, 12, 13, 14, 15, 25, 26 et 27)[17].

### II.3.5 Convertisseur Numérique-Analogique (DAC)

Les canaux 8 bits de deux Convertisseurs Numérique-Analogique (DAC) peuvent être exploités pour la conversion dans les divers domaines applicatifs électroniques, des valeurs numériques en tensions analogiques avec précision et fiabilité.[16] Ce double Convertisseur Numérique-Analogique (DAC) prend en charge l'alimentation comme référence de tension d'entrée et et les conversions sont réalisées de manière indépendante.

### II.3.6 SPI (Serial Peripheral Interface)

L'ESP32 est pourvu de trois interfaces SPI (SPI, HSPI et VSPI). Chacune de ces trois interfaces peut fonctionner indifféremment en mode maître ou en mode esclave. HSPI et VSPI sont indépendants et permettent d'initier une communication entre l'ESP32 et d'autres périphériques, chaque bus pouvant gérer jusqu'à trois périphériques esclaves SPI. Par ailleurs, de nombreuses cartes à base d'ESP32 sont configurées par défaut avec des broches SPI déjà attribuées, permettant dès lors d'utiliser simultanément HSPI et VSPI pour adresser plusieurs périphériques SPI.[16].

Les fonctionnalités SPI courantes permettent la prise en charge de la communication full-duplex/half-duplex sur quatre lignes et de la communication half-duplex sur trois lignes. La synchronisation des transferts est réalisée par blocs d'un octet ; par ailleurs, le support de formats de communication particuliers pour des périphériques esclaves comme le flash permet le passage automatique entre l'accès flash et la SRAM.[11].

### II.3.7 I2C (Inter-Integrated Circuit)

L'ESP32 dispose de deux interfaces I2C clairement identifiées sur le module sous Les désignations SDA et SCL correspondent à deux lignes de communication qui permettent de piloter un bus I2C en mode maître en déclenchant les échanges ou en mode esclave en répondant aux requêtes du maître. Les lignes I2C sont de plus configurables dans le logiciel, ce qui vous prend la main dans la conception de votre projet. Les interfaces I2C rendent possible la communication I2C en mode standard (100 KHz) et en mode rapide (400 KHz)[16].

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

### II.3.8 PWM (Pulse Width Modulation)

Le circuit affiche 25 canaux (presque tous les broches) de la broche PWM contrôlés par le contrôleur PWM tel que le PWM Timer et le PWM Operator. Le PWM est sortant et peut donc piloter des moteurs numériques et des DELs. Il est constitué de PWM Timer et de PWM Operator. Chaque timer PWM fournit une synchronisation sous forme synchrone ou indépendante, et chacun PWM operator génère la forme d'onde pour un canal PWM.[41].

### II.3.9 Interruptions externes

Les interruptions externes sur ESP32 constituent un outil permettant de détecter en temps réel des événements tout en. L'utilisation de ce moyen est un puissant levier pour optimiser tant le rendement que la consommation d'énergie de votre système (réaction rapide et efficace aux événements extérieurs). Si vous voulez détecter un événement, comme l'appui d'un bouton, sans avoir à scruter en permanence l'état de la broche GPIO, les interruptions permettront de choisir un traitement se déclenchant sur événement en temps réel tout en laissant le processeur du micro-contrôleur mener d'autres tâches. Le fonctionnement général d'une interruption est donc le suivant [12] :

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

### II.3.10 Montage et connexions électriques

Le circuit est alimenté à partir d'une prise secteur 230 V, mise à disposition par le laboratoire de recherche. Les différents composants sont reliés conformément au schéma électrique conçu, en tenant compte des normes de sécurité électrique.



FIGURE II.11 – Test de la réalisation pratique

### II.3.11 Résultats et interprétations

### II.3.12 Résultats avec alimentation 1 ordinateur

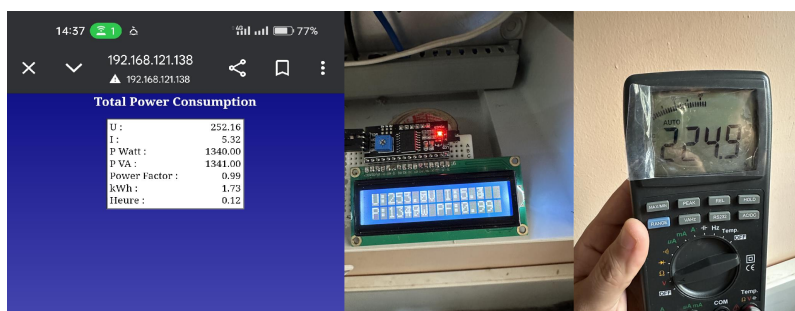


FIGURE II.12 – Test de la réalisation pratique d'une charge pc=1

### II.3.13 Résultats avec alimentation 2 ordinateur

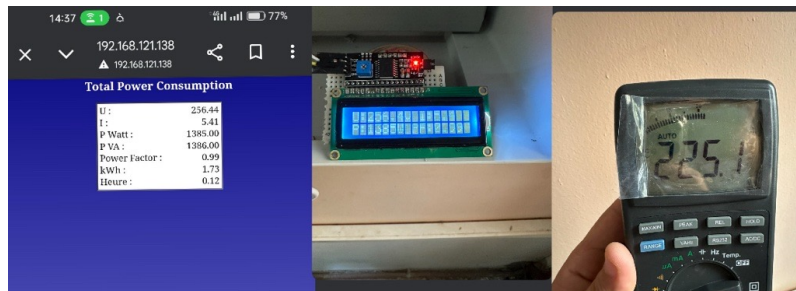


FIGURE II.13 – Test de la réalisation pratique d'une charge pc=2

### II.3.14 Résultats avec alimentation 11 lamp

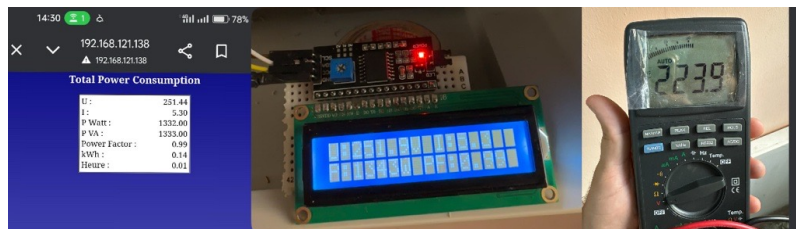


FIGURE II.14 – Test de la réalisation pratique d'une charge 11 lamp

### Interprétation

Le microcontrôleur ESP32, programmé avec un serveur web embarqué, permet l'affichage des données mesurées (tension, courant, puissance) sur une page web accessible via l'adresse IP locale de l'ESP32. Les mesures sont mises à jour en temps réel et dans le test la tension il y a un problème dans le Transformateur abaisseur de tension 230 V / 6 V

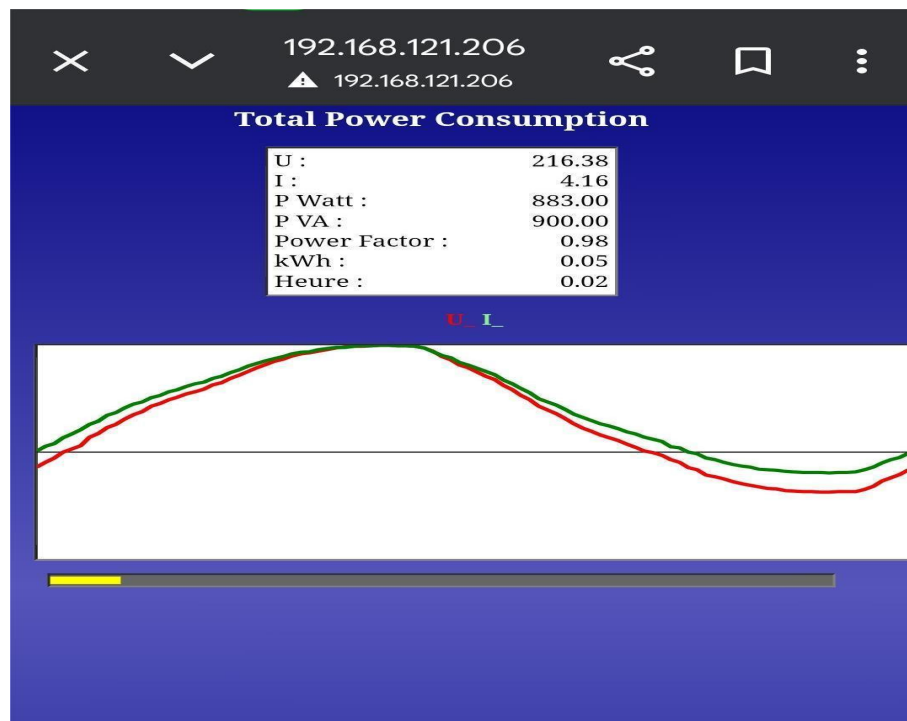


FIGURE II.15 – Visualisation des mesures via la page web

### Analyse des résultats

1. **Consommation d'énergie équilibrée** : Lorsque les courbes de tension et de courant sont en phase, cela indique que la charge consomme une puissance active de manière optimale. Cela signifie également qu'aucune puissance réactive inutile n'est produite.
2. **Efficacité énergétique** : Un déphasage nul entre la tension et le courant implique un facteur de puissance élevé (proche de 1). Cette condition traduit une efficacité énergétique maximale, minimisant les pertes dans le système.

### II.3.15 Conclusion

En conclusion, le projet de routeur solaire intégrant la mesure de puissance et l’affichage des courbes électriques via une interface web présente plusieurs avantages majeurs :

- **Surveillance en temps réel** : Grâce à l’affichage en ligne des mesures, il est possible de suivre la consommation énergétique instantanée du système.
- **Optimisation de la consommation** : L’analyse des courbes permet d’identifier les pics de consommation, les fluctuations ou les comportements anormaux, favorisant ainsi une meilleure gestion énergétique.
- **Contrôle à distance** : L’intégration du serveur web dans l’ESP32 offre la possibilité de contrôler des éléments du système (relais, actionneurs) à distance via un navigateur.
- **Solution durable et intelligente** : Ce système contribue à une gestion intelligente et durable de l’énergie, en facilitant la prise de décision pour optimiser l’usage de l’énergie solaire.

## Chapitre III

# Réalisation matérielle du routeur photovoltaïque

## III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la concrétisation matérielle du routeur photovoltaïque, un dispositif intelligent conçu pour optimiser l'utilisation de l'énergie solaire produite. Cette section détaille l'ensemble des composants nécessaires à la mise en œuvre du système, depuis la description fonctionnelle du routeur jusqu'au montage complet. Nous abordons successivement les fonctionnalités principales, l'intégration des capteurs de mesure, les modules de commande, ainsi que les interfaces de communication. Un accent particulier est mis sur le rôle central de l'ESP32, qui assure à la fois le traitement des données et la connectivité WiFi. Cette approche matérielle constitue une étape cruciale dans la transformation du concept en un système opérationnel et autonome.

## III.2 Routeur photovoltaïque

Un routeur photovoltaïque, un dispositif de gestion de l'énergie solaire, constitue une ressource pour réaliser des économies d'énergie en permettant d'optimiser l'autoconsommation des énergies solaires produites par l'installation photovoltaïque à travers une réorientation du surplus vers une charge programmée (ballon d'eau chaude, chauffage, pompe de piscine...) et ce, au lieu d'être perdue. Pour éviter une surcharge, le routeur s'engage à ne pas soutirer ni injecter d'énergie sur le réseau public et doit équilibrer le flux entre le système et la charge (la puissance délivrée varie selon la production d'énergie et la consommation du dispositif). Il est ainsi un élément vital pour gérer la production et la consommation énergétique du système photovoltaïque.[30].

### III.2.1 Fonctionnalités d'un routeur photovoltaïque

1. Suivi de la production d'électricité d'origine solaire : Le routeur solaire contrôle la quantité d'électricité instantanément produite par les panneaux solaires. de la consommation d'électricité : Il contrôle la consommation d'électricité de votre maison avec toutes les charges disponibles, appareil par appareil.
2. Gestion intelligente : En tenant compte de la production et de la consommation, le routeur solaire décide en temps réel de la meilleure façon d'utiliser l'électricité d'origine solaire excédentaire. Ce qui permet de :
  - Piloter l'excédent vers des appareils électriques : chauffe-eau, climatisation. . .
  - Stocker le surplus dans des batteries pour l'utiliser plus tard en cas de peu ou pas de production
  - Revendre le surplus au réseau électrique si vous en avez les contrats et si vous devenez fournisseur d'électricité.

### III.2.2 Schéma fonctionnel du système proposé

Le schéma ci-joint montre le câblage électrique du système que nous devons mettre en place. Le premier est constitué de fils d'électricien et de fils Dupont femelles. Nous passerons la phase du réseau en sortie du disjoncteur principal par la sonde mobile du capteur JSY-MK-194 pour faire démarrer le routeur. La seconde sonde fixe de ce module permettra de

mesurer le courant et la puissance en sortie du Triac qui alimente la charge supplémentaire « ventilateur chauffant ». La transmission des mesures se fait par liaison série vers l'ESP32. La fiche technique de l'ESP32 WROOM donne des explications techniques précises sur cet élément de développement. Le tableau ci-après détaille les informations relatives aux éléments de base constituant cette carte :

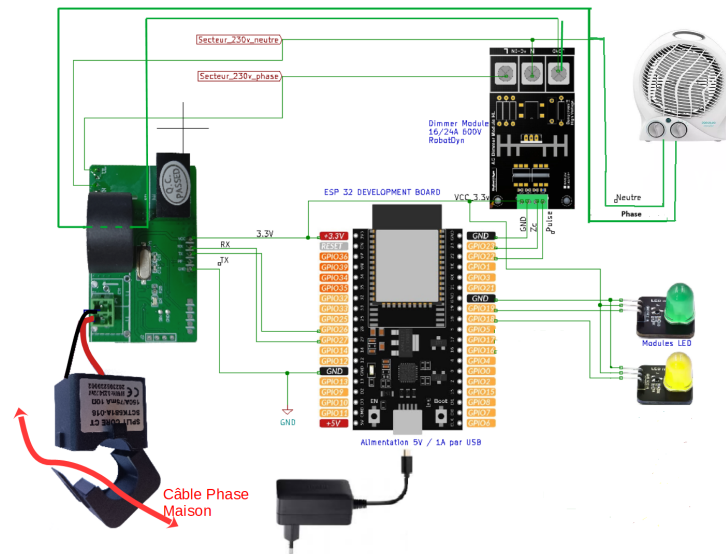


FIGURE III.1 – Schéma fonctionnel du système proposé

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 :

### III.2.3 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 [18] :

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...");
```
- Afficher l'adresse IP attribuée au module ESP32 :

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

### III.3 Capteur JSY-MK-194T

#### III.3.1 Définition

Le JSY-MK-194T est un module utilisé pour les systèmes photovoltaïques, en particulier pour réaliser un routeur photovoltaïque, à savoir un capteur de courant permettant de mesurer la consommation d'énergie d'un circuit en faisant passer dans son champ magnétique le fil de phase du réseau. Ce module est relié à un microcontrôleur ESP32 par connexion série permettant le partage des données mesurées sur deux canaux par les deux sondes de courant au microcontrôleur.[\[34\]](#).

Une sonde mobile à courant est placée autour du fil de phase du disjoncteur principal pour alimenter le routeur. Une deuxième sonde fixe sur le module mesure par exemple le courant et la puissance à la sortie du triac. [\[34\]](#).

#### III.3.2 Principe des mesures (tension alternative, courant alternatif)

Le capteur JSY-MK-194T fonctionne sur le principe de l'induction électromagnétique pour réaliser la mesure de l'alternatif (tension alternative, courant alternatif). Ce dernier détecte les variations du champ magnétique dans le conducteur propagées par le courant alternatif circulant dans ce dernier.

Le capteur peut mesurer l'alternatif puisque le champ magnétique, généré par le passage du courant alternatif dans le conducteur, est ensuite converti en lui-même, de sorte que la mesure de l'alternatif en propriété équivaut à celle de la courbe du champ magnétique dans le conducteur.

De la même manière, le capteur est en mesure de mesurer la tension alternative à partir du champ électrique qui est produit par la tension au sein d'un circuit. Ce champ électrique peut donc être converti en une valeur de tension alternative.

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

### III.4 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.

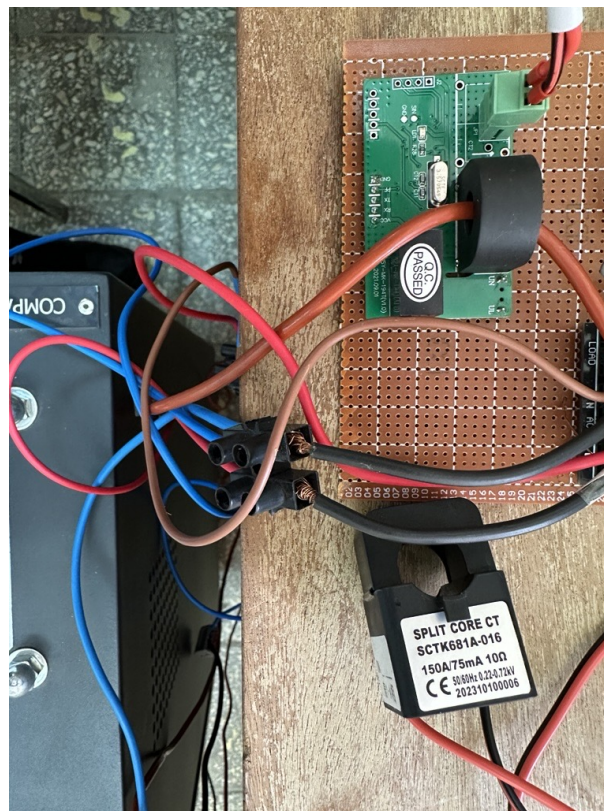


FIGURE III.2 – capteurjksk.png

- 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.

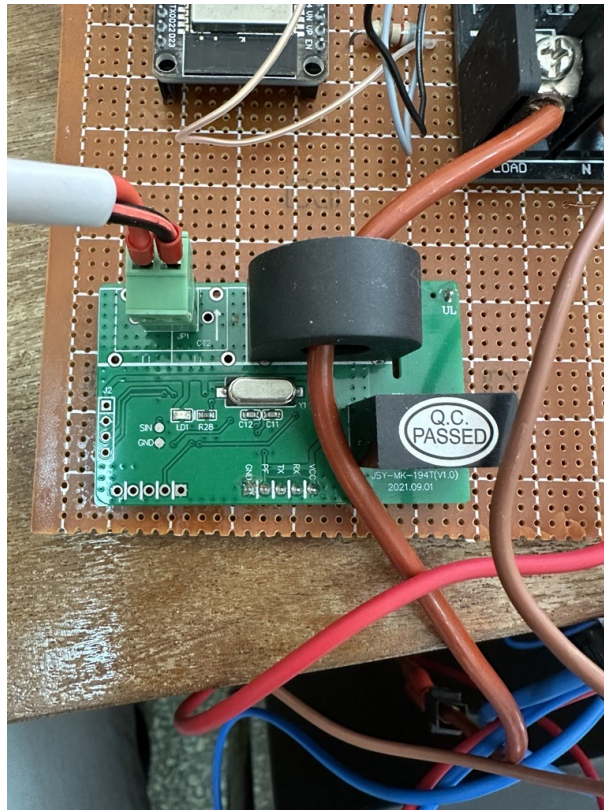


FIGURE III.3 – Principe de mesure avec le capteur JSY-MK-194T

## III.5 Présentation du module gradateur AC Robotdyn

### III.5.1 Description du module

Le variateur AC Robotdyn est une petite boîte permettant de faire varier la tension à ses bornes suite à une commande, extérieure à lui, d'un arduino par exemple. Ce module, produit par Robodyn, utilise un triac BTA 16/24A 600V et s'utilise avec un arduino ou autre. Destiné à des applications de puissance relativement faible cet équipement a une performance maxi de 16A/24 au maximum grâce à son petit radiateur. Le module est devenu récemment le choix d'un certain nombre d'installations domotiques.[20].

Le module est pourvu d'un détecteur "Zero Crossing" garantissant la sécurité du système. Il produit une impulsion de 3,3V à chaque passage à zéro de la tension alternative du secteur 230V. Ce signal permet à l'ESP32 de synchroniser ses commandes en fonction du secteur[31].

### III.5.2 Gradateur Triac 16A/24A

Le triac est un composant de type semi-conducteur bidirectionnel apte à laisser passer le courant dans les deux sens. On peut synonymiser cet élément à la mise en parallèle de deux thyristors montés tête-bêche (l'anode de l'un étant liée à la cathode de l'autre, les gachettes respectivement contrôlées simultanément). Son utilisation en alternatif est sans doute plus facile à repérer, puisqu'il exploite les deux alternances. Ce composant est donc

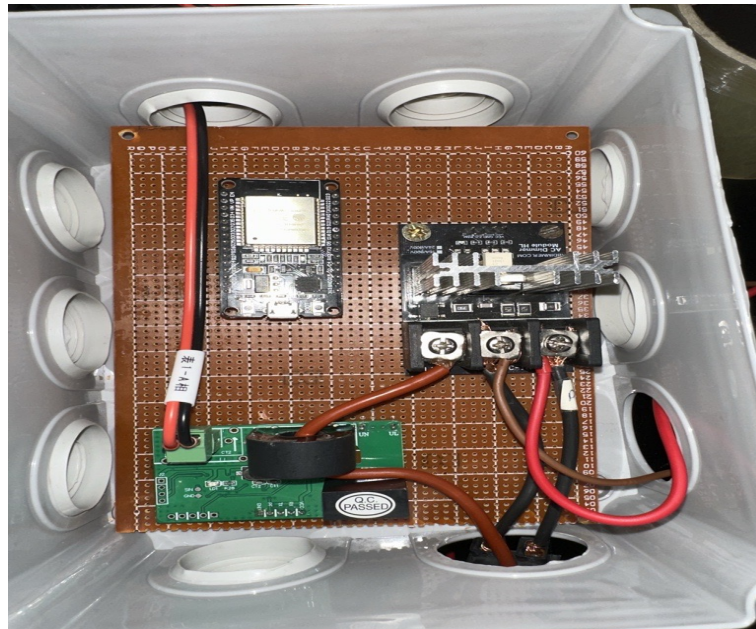


FIGURE III.4 – Circuit de branchement à l'ESP32

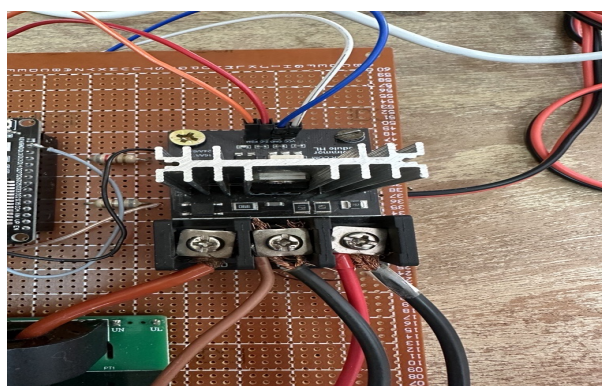


FIGURE III.5 – Module gradateur AC Robotdyn

largement utilisé, car il permet de contrôler la puissance delivery à une charge en courant alternatif (AC) et est capable de couper et de laisser passer le courant alternatif.[3].

Le triac est un élément central du routeur, il est apte aux systèmes électriques de 230 V et peut être piloté par un signal logique de 3,3 V ou 5 V. Ce composant fonctionne

comme un interrupteur pour la commande du 230V, Quand une impulsion est présentée à la gâchette (gate), le courant est acheminé entre les deux anodes jusqu'à ce que la tension redescende à zéro, ce qui le désactive. La phase du courant alternatif de 230V est raccordée à A2 tandis que la charge est attaché à A1.[31].

### III.6 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 :

#### III.6.1 Matériel demandé

*itemize)* **Une alimentation monophasé :** Dans notre circuit, on utilise une alimentation variable pour mesurer et visualiser le changement de la tension alternatif.



FIGURE III.7 – Valeur de tension affichée dans le voltmètre

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

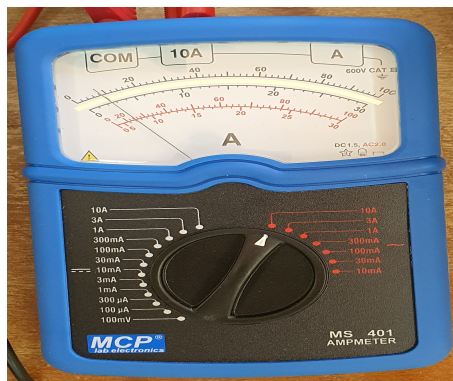


FIGURE III.8 – Valeur de courant affichée dans l'ampèremètre

**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 III.9 – Charge resistive

### III.6.2 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 III.10, sans oublier le code source du programme ESP32 pour faire des essais expérimentaux dans le but d'évaluer la réalisation.



FIGURE III.10 – Réalisation pratique

### III.6.3 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.

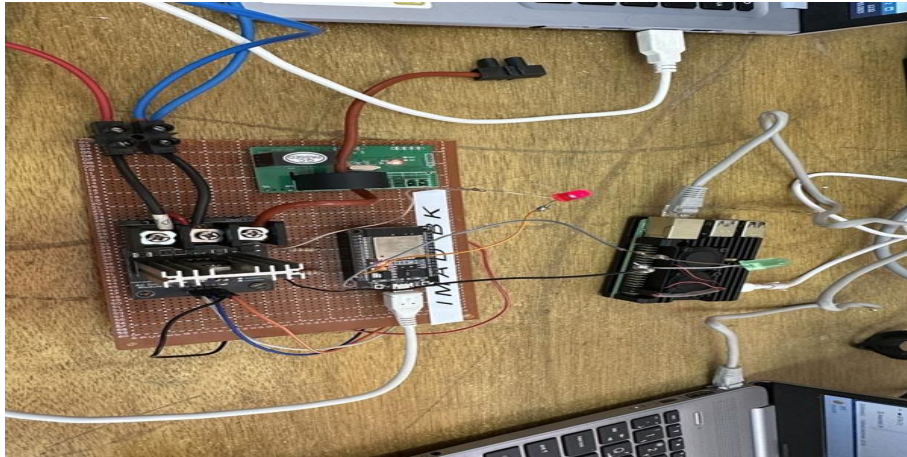


FIGURE III.11 – Routeur photovoltaïque

#### 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.

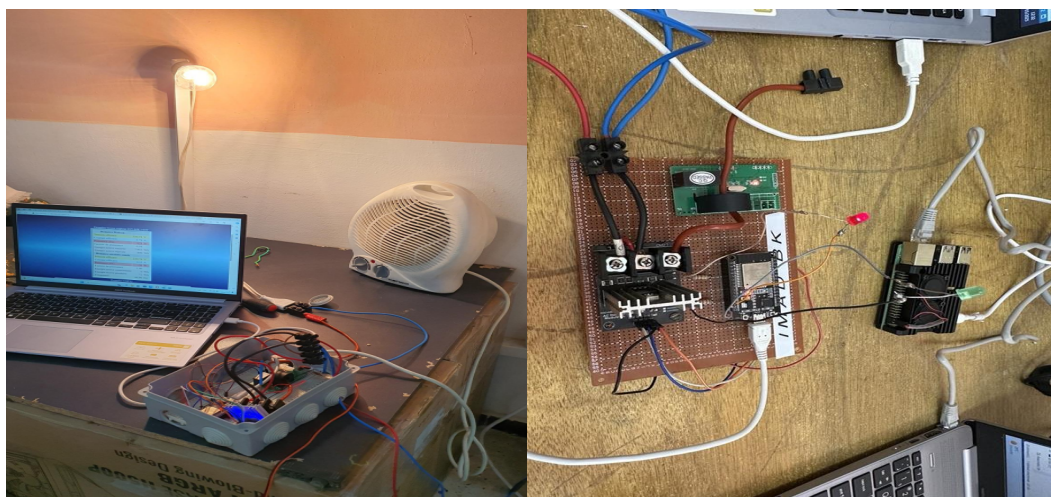


FIGURE III.12 – Routeur connecter avec des charges supplémentaire

### III.6.4 ESP32 Wroom avec Écran lcd 1286B-v2.3 et extension des GPIOs

#### III.6.5 définition

Un écran LCD (Liquid Crystal Display, ou "affichage à cristaux liquides") est une technologie d'affichage qui utilise des cristaux liquides placés entre deux plaques de verre polarisées. Ces cristaux s'orientent sous l'effet d'un courant électrique, modulant la lumière pour former des pixels. Contrairement aux écrans OLED, les LCD nécessitent un rétroéclairage (LED ou CCFL) pour être visibles.



FIGURE III.13 – Écran lcd

#### III.6.6 Spécificités du modèle 1286B-v2.3

- Le 1286B-v2.3 est un modèle spécifique d'écran LCD, probablement caractérisé par :
  - Résolution (ex : 128×64 pixels, 240×320, etc.).
  - Type d'interface (I2C, SPI, parallèle) pour la communication avec un microcontrôleur.
  - Taille (diagonale en pouces, souvent 1,3" à 3,5" pour les projets DIY).
  - Tension d'alimentation (3,3V ou 5V).
  - Fonctionnalités additionnelles (écran tactile, rétroéclairage réglable).

#### III.6.7 Avantages et limites

- Faible consommation (vs écrans CRT).
- Coût réduit pour les petites tailles.
- Angles de vision limités (sans technologie IPS).
- Noirs moins profonds que les OLED.

### III.7 Conclusion

La réalisation matérielle du routeur photovoltaïque a permis de traduire le concept théorique en un prototype fonctionnel. Grâce à l'intégration judicieuse des différents composants

capteurs, microcontrôleur ESP32, module gradateur et interface utilisateur

le système est capable de mesurer, analyser et contrôler la distribution de l'énergie solaire de manière efficace. Cette étape a mis en évidence les contraintes techniques et les choix d'optimisation nécessaires à la fiabilité et à la performance du dispositif. Ainsi, la base matérielle du projet est désormais prête pour accueillir les développements logiciels et les phases de test qui suivront.

## Chapitre IV

# Réalisation logicielle et interfacages

## IV.1 Introduction

L'interfaçage se définit comme étant la connexion et la communication entre divers composants électroniques et/ou logiciels permettant ainsi la transmission efficace de données et de signaux. À l'inverse, la surveillance se veut être le fait d'autoriser l'évaluation, la mesure des performances des systèmes électroniques pour contribuer à leur bon fonctionnement, et représenter un reflet de l'éventuel défaillance. Les deux étant complémentaires pour assurer la fiabilité et la sécurité des systèmes en un large spectre d'applications technologiques.

Nous allons voir ci-après l'interfaçage et la surveillance de notre système de mesure de puissance solaire sur une plateforme page web via une adresse IP et du service en ligne "ThingSpeak". L'interfaçage de ces plateformes nous permet de collecter, stocker et visualiser efficacement les données tout en assurant en temps réel une surveillance de l'état en se connectant à partir de n'importe quel appareil connectable à Internet.

## IV.2 Conception logicielles

Le logiciel IDE (Interactive Development Environment) Arduino offre une interface minimale pour rédiger des programmes appelés "Sketch", les compiler, les transférer dans les cartes Arduino, microcontrôleurs, ESP32, ESP826..., à travers une liaison USB, intégrant aussi un moniteur de port série pour l'affichage des données. Il intègre un éditeur de code avec coloration syntaxique, une barre d'outils classique pour accéder aux différentes fonctions de l'interface IDE. La figure V.2 montre la présentation de l'interface du logiciel Arduino IDE. [49].



FIGURE IV.1 – Logo logiciel Arduino IDE [10]

Le langage de l'IDE Arduino est un mélange C/C++, avec un jeu d'instruction très riche. Dès l'ouverture, L'interf de logiciel Arduino se présente comme suit :

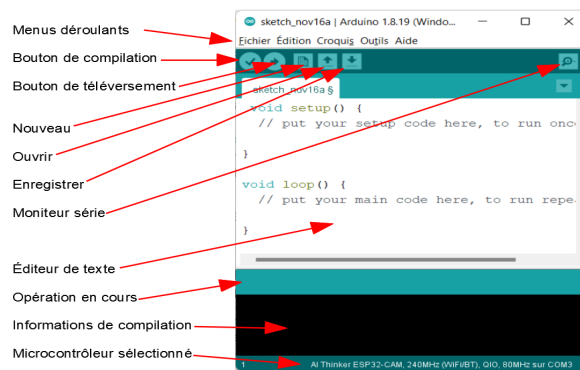


FIGURE IV.2 – Interface Arduino [14].

Après avoir ouvert l'IDE :

1. Le code source est chargé dans l'éditeur de texte de l'IDE : c'est le programme qui va être exécuté par le microcontrôleur dans un langage compréhensible par le développeur. [14].
2. Connexion du microcontrôleur au port USB[14].
3. Choix du driver correspondant au microcontrôleur connecté, le développement ne sachant pas directement à qui parler, ni comment parler [14].
4. Compilation du programme source, procurant un code source devenu incompréhensible de la part d'un développeur, mais compréhensible pour un microcontrôleur[14].
5. Downloading the machine code into the microcontroller, via the USB connection (serial port)[14].
6. Le microcontrôleur programmé peut être déconnecté de l'ordinateur et être implanté dans son montage électrique[14].

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(IV.3).

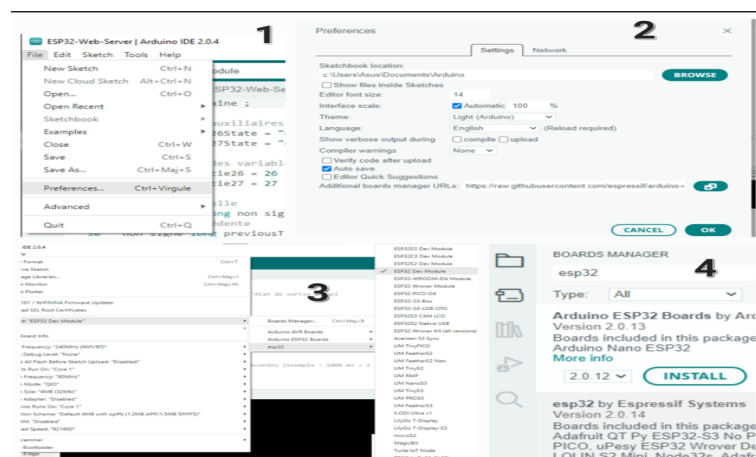


FIGURE IV.3 – Configuration de l'IDE avec la carte ESP32

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

Il est à noter que la valeur efficace RMS (Root Mean Square) d'un signal est une mesure de la valeur moyenne de celui-ci sur une durée de temps choisie. Environ 120s sont nécessaires pour mesurer les deux valeurs de la tension et du courant. Dans les faits, on compte effectuer la collecte de 100 couples de valeurs sur une période de 20ms, représentant, en principe, une description utile de la tension a priori sinusoidale, mais souvent chahutée par les alimentations à découpage. Pour avoir des mesures correctes, il faut s'assurer que les échantillons de tension et les échantillons de courant sont bien pris de façon synchrone.

— Courant efficace :

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

— Tension efficace :

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

### IV.2.2 Calcul des puissances active et apparente

Après avoir calculé les valeurs efficaces VRMS et IRMS, on peut déterminer les puissances suivantes :

- Puissance active (W) : correspond à la puissance effectivement utilisée par un circuit.

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

- Puissance apparente (VA) : correspond à la totalité de la puissance consommée par un circuit. Correspond à la valeur efficace de la tension multipliée par la valeur efficace du courant, on a l'expression [\(IV.4\)](#) .

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

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

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

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

Cette formule [\(IV.6\)](#) 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.

### IV.2.3 Fonctionnalités du code

En premier lieu, si on utilise l'IDE Arduino pour écrire le code et injecté au moyen d'une connexion série, une fois le code sur le PCB on pourra le modifier par le WIFI qui permet de l'interfaçage sue une Page Web, à savoir qu'il s'agit d'un code du projet Arduino qui utilise un ESP32 pour mesurer la consommation électrique d'un appareil et la transmettre à un serveur Domotice via un réseau WiFi. Le code va être écrit en C++ et recourir à la bibliothèques ArduinoOTA pour permettre la mise à jour à distance.

1. Il commence par inclure les bibliothèques correspondantes comme WiFi.h, ESPmDNS.h, WiFiUdp.h, WiFiClient.h, WebServer.h, ArduinoOTA.h et RemoteDebug.h.
2. Celles-ci permettent la définition des constantes et des variables à utiliser dans le code : nom du réseau WIFI, mot de passe, adresse IP statique, le nom de l'hôte Domoticz, port d'écoute, indice de la valeur de puissance à envoyer à Domoticz, etc.
3. Le code établit la fonction de mesure de la consommation électrique (tension, courant, facteur de puissance, puissance ) à réaliser dans les deux cas à savoir sans panneaux et avec panneaux, enregistrement des données et transmission à Domoticz (page web et thingspeak).
4. Configurer les broches GPIO pour les valeurs des capteurs de courant et de tension, contrôler les relais et 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. De plus, il est utilisé ArduinoOTA pour la mise à jour à distance. Cette partie de l'interfaçage du routeur, soit sous forme de page web ou bien avec thingspeak, exploite les résultats de deux cas : le routeur dans le cas de la maison dans le mode nuit (sans panneaux) et le deuxième cas avec panels.

### IV.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 pourvu de connexion Wi-Fi, sans avoir besoin de votre routeur. Quand vous faites de l'ESP32 votre point d'accès, vous créez aussi son propre réseau Wi-Fi et les périphériques Wi-Fi (stations) environnants peuvent s'y connecter comme votre smartphone ou votre ordinateur. Vous n'avez donc pas besoin d'une connexion à un routeur pour le contrôler. [29].

Il suffit de saisir l'adresse IP de l'ESP32 dans la case d'adresse de votre navigateur web ce qui peut aussi permettre de faire communiquer plusieurs périphériques entre eux sans avoir besoin d'un routeur.

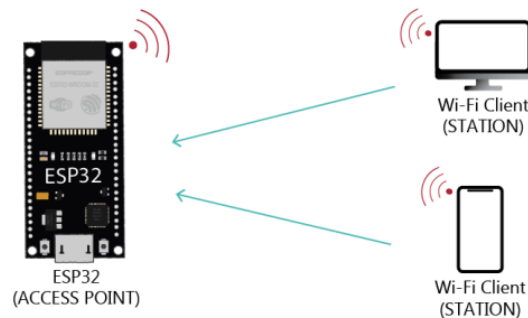


FIGURE IV.4 – Périphériques d'interfaçage avec Wi-Fi [29].

#### IV.3.1 Résultats

Le logiciel implanté dans l'ESP32 introduit un serveur Web qui affiche sur une page : les différentes mesures ainsi que les graphiques de tension, puissance et courant. Pour accéder à cette page, il est suffisant de taper l'adresse IP de l'ESP32 dans la barre d'adresses de votre navigateur Web.

##### IV.3.1- avec panneaux

```

13:27:57.867 -> cle : 812567808
13:27:57.867 -> Mémoire EEPROM utilisée : 42%
13:27:57.867 -> SSID:iPhone 12pro max
13:27:57.867 -> Pass:123456789
13:27:57.867 -> : WiFi begin: iPhone 12pro max
13:27:57.992 -> : 6.6IP address: 172.20.10.3
13:27:58.861 -> Connected IP address: 172.20.10.3 or <a href='http://RMS-ESP32-16282960.local' >RMS-ESP32-16282960.local/</a>
13:27:58.861 -> : Connected IP address: 172.20.10.3
13:27:58.861 -> Source : UxIx2
13:27:59.643 -> Mesure Température invalide Niveau Signal WIFI:-59
13:28:04.682 -> IP address: 172.20.10.3
13:28:04.682 -> WiFiBug:0
13:28:04.682 -> Charge Lecture RMS (cœur 0) en ms - Min : 2 Moy : 1 Max : 927
13:28:04.682 -> Charge Boucle générale (cœur 1) en ms - Min : 1 Moy : 1 Max : 319
13:28:04.729 -> ESP32 ON depuis : 0.00 heures
13:28:05.478 -> Mesure Température invalide Notification de l'heure ( time synchronization event )
13:28:07.399 -> Sync time in ms : 10800000
13:28:07.399 -> 10/06/2025 14:28:08 : Réception de l'heure
13:28:17.651 -> Guru Meditation Error: Core 1 panic'ed (LoadProhibited). Exception was unhandled.
13:28:17.651 ->
13:28:17.651 -> Core 1 register dump:
13:28:17.651 -> PC      : 0x400d6e98  PS      : 0x00060d30  A0      : 0x800e0ec4  A1      : 0x3ffdb220
13:28:17.651 -> A2      : 0x3ffdb204  A3      : 0x0028bbed  A4      : 0x3ff4015a  A5      : 0x94450b52
13:28:17.651 -> A6      : 0x00000000  A7      : 0x000003ff  A8      : 0x94450b52  A9      : 0x3ffdb1e0
13:28:17.682 -> A10     : 0x00000000  A11     : 0x00000070  A12     : 0x00000050  A13     : 0x00000005
13:28:17.683 -> A14     : 0xffffffff  A15     : 0x00000030  SAR     : 0x00000010  EXCCAUSE: 0x0000001c
    
```

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

Avec une charge résistive de 15% :

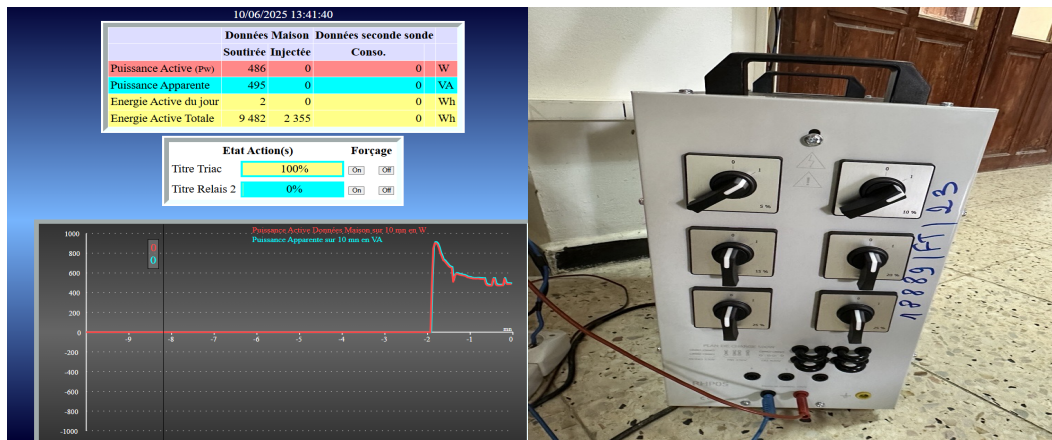


FIGURE IV.6 – Résultats des données sur page Web et écran Lcd 15%.

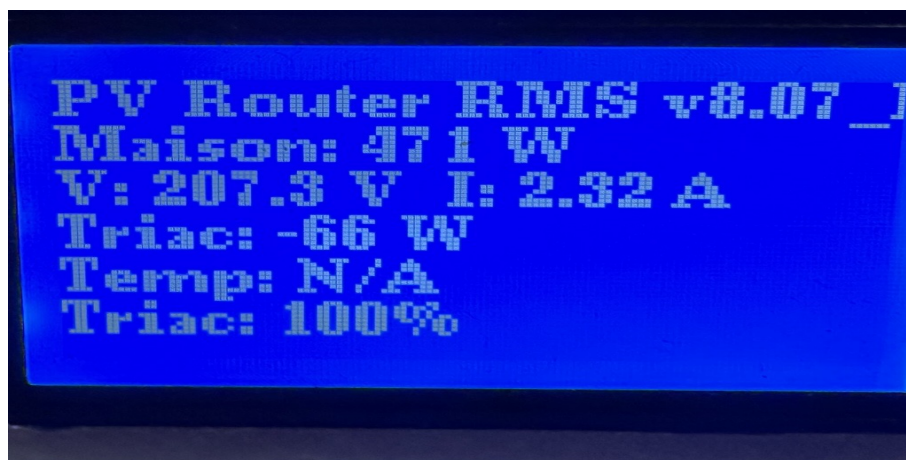


FIGURE IV.7 – Puissance active et apparent avec une charge de 15%.

Avec une charge résistive de 40% :

## Réalisation et résultat

### Introduction :

Pour les résultat de notre travail en à mis ce montage qui contiens le pc portable pour la commande Arduino et notre routeur et en a séparer coter maison qui sont les deux charge et coté réseau pour mieux avoir les résultat en déficit et en surproduction en ajoutant aussi une charge supplémentaire.



Figure IV.8:Montage de Roteur solaire

En vas passer maintenant à notre teste en commence par :

**-Déficit** : en définition c'est que la production d'énergie solaire est inférieure à la consommation des panneaux alors on puise l'électricité nécessaire du réseau.

### Routeur - RMS

10/06/2025 13:35:38

Données brutes capteur JSY-MK-194T

| Données Maison           |        |    |
|--------------------------|--------|----|
| Tension efficace         | 192.92 | V  |
| Courant efficace         | 4.15   | A  |
| Puissance (Pw)           | -763   | W  |
| Facteur de puissance     | 1.00   |    |
| Energie active soutirée  | 9 461  | Wh |
| Energie active injectée  | 2 322  | Wh |
| Données seconde sonde    |        |    |
| Tension efficace         | 192.92 | V  |
| Courant efficace         | 0.00   | A  |
| Puissance (Pw)           | 0      | W  |
| Facteur de puissance     | 0.00   |    |
| Energie active consommée | 0      | Wh |
| Energie active produite  | 251    | Wh |
| Fréquence                | 49.96  | Hz |

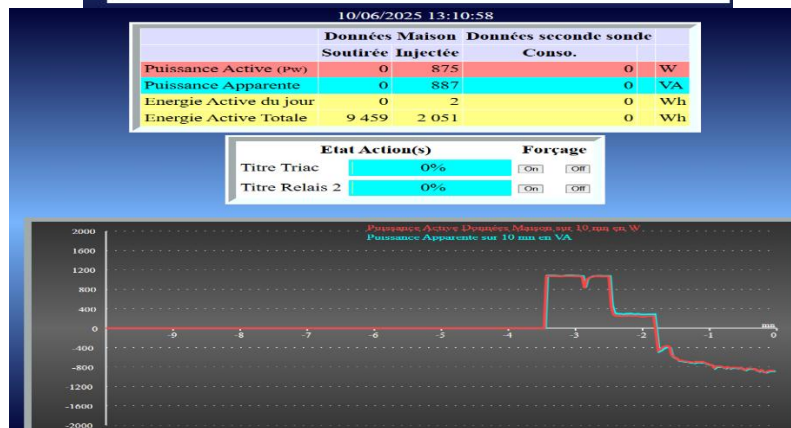


Figure IV.7: pour charge 25%

En charge de 25% Les indicateurs négatifs (-3 à 0 W) sur une durée de dix minutes indiquent que votre domicile envoie un surplus d'énergie modeste au réseau. Par ailleurs, les fonctions de contrainte offrent la possibilité de gérer manuelle, en a une puissance de 875w en déficit

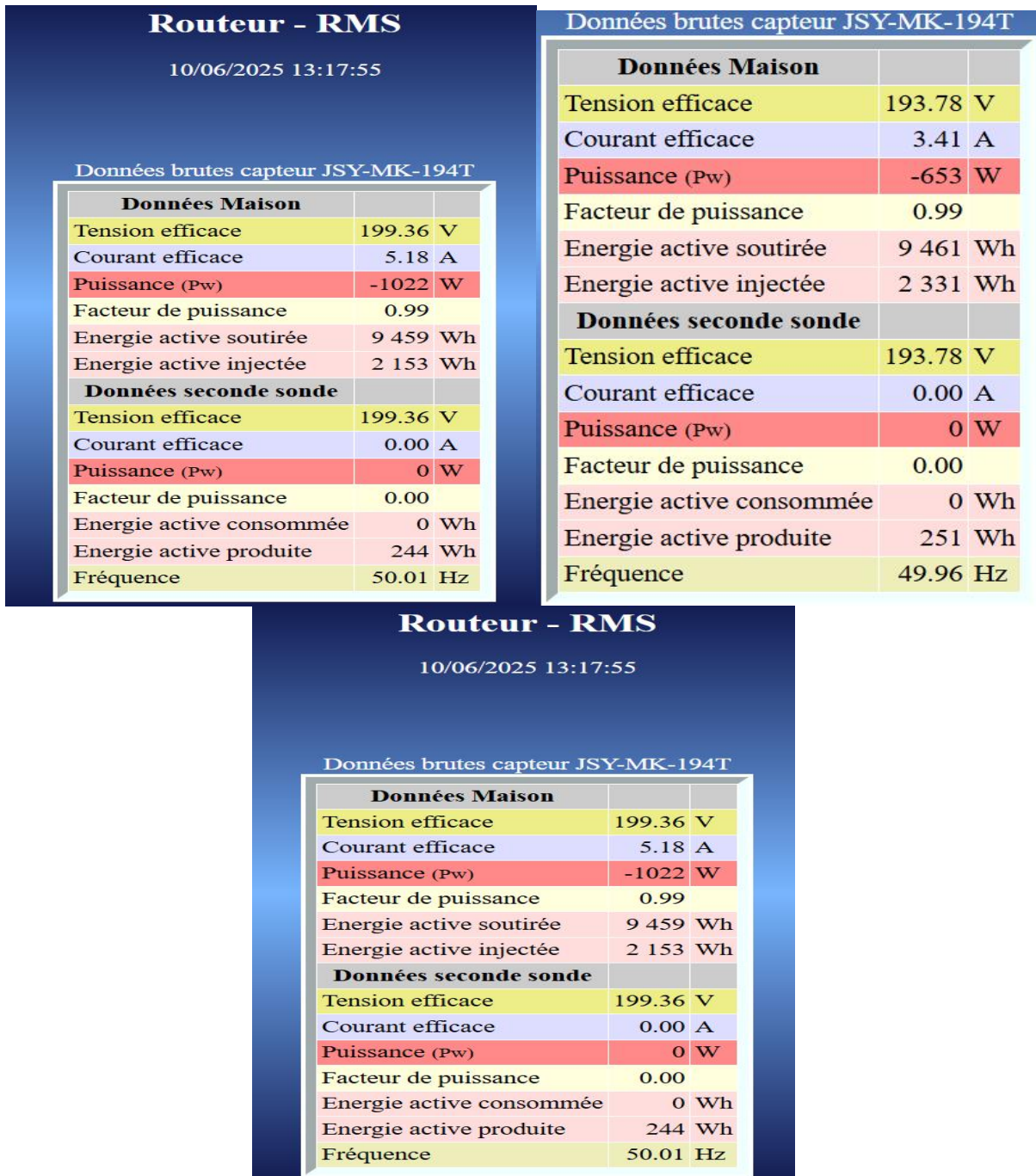


Figure IV.8:

donné routeur maison (déficit)

Votre équipement insère 1022 W dans le réseau (puissance négative) avec une efficacité remarquable (facteur de puissance 0.99), alors que la deuxième

L'énergie prélevée (9 459 Wh) excède de beaucoup l'énergie alimentée (2 153 Wh), attestant d'une consommation nette inédite, bien que la production soit actuelle.

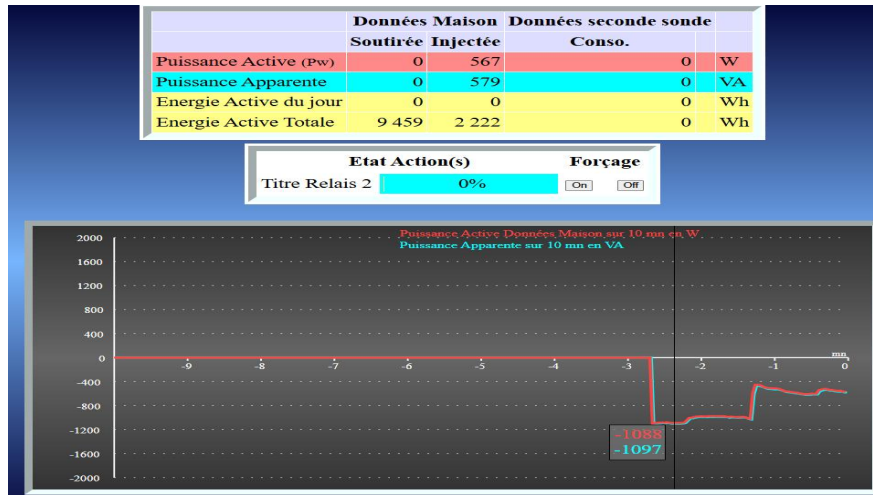


Figure IV.9: pour charge 50%



Figure IV.10: écran LCD avec mesure

En vas maintenant expliquer les figures :

Prenons la figure (2) et la figure (4) et comparant entre les deux graphes :

La figure (2) en prend le graphe et en remarque une injection de 875w dans le réseau et pour la maison en a 0 w soutirés et 0 w consommés alors en dit que la production solaire est supérieure à la consommation et comme la maison ne demande pas d'énergie elle l'injecte dans le réseau et on remarque ça autour de moins de 4 minutes par contre pour la figure (4) on remarque une injection de

567w en observe sur le graphe une puissance négative d'environ -1088w vers 3 minutes et ça signifie que la maison a demander de l'énergie mais n'a pas été satisfaite par la production des panneaux alors la en a un déficit, et en remarque ça aussi bien sur la figure(6) et je clarifier que le travail a était fait dans un climat nuageux.

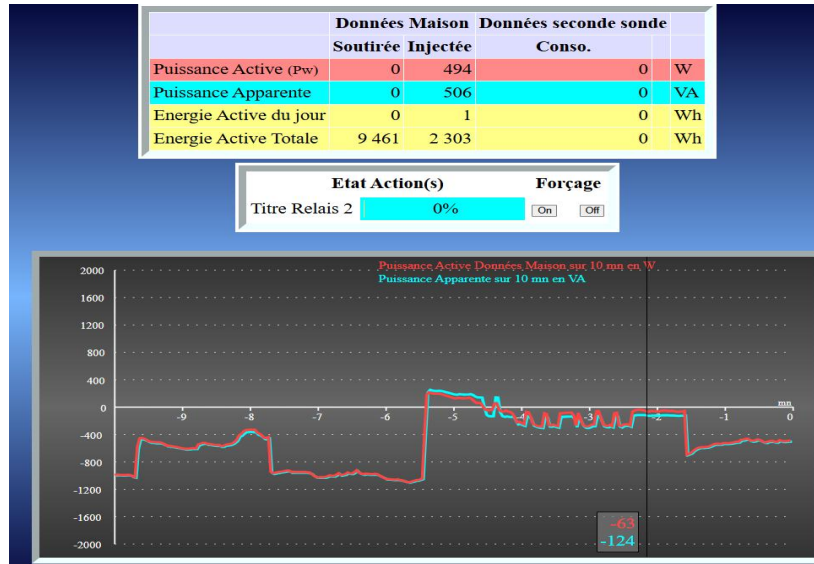


Figure IV.11: pour charge 75%

En a utiliser une charge supplémentaire de 75% en remarque un déficit qui est 0 a -6 mn la puissance et de -950w après sur -5 mn il y'a une saut de puissance 320w a c'est la puissance injecter par réseau c'est la puissance que la maison demande pour comblé le manque.

minutes et ça signifie que la maison a demander de l'énergie mais n'a pas été satisfaite par la production des panneaux alors la en a un déficit, et en remarque ça aussi bien sur la figure(6) et je clarifier que le travail a était fait dans un climat nuageux.

**-surproduction :** c'est la production d'énergie des panneaux solaires quand elle dépasse la consommation instantané de la maison, et le surplus et alors injecter dans le réseau public ou bien stocké.

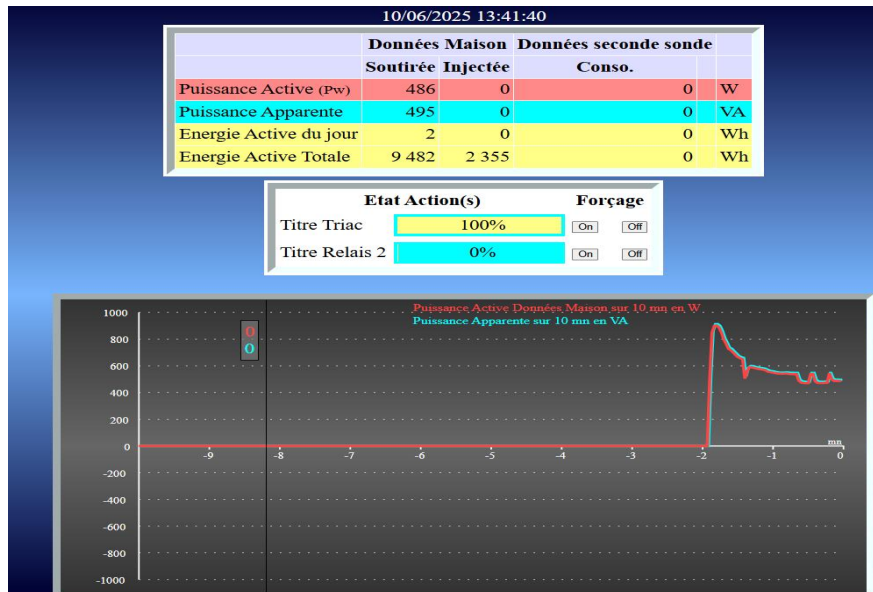


Figure IV.12: pour charge 100%

Actuellement, la maison utilise 486 W d'énergie active sans renvoyer d'énergie vers le réseau. La puissance apparente est de 495 VA, ce qui révèle un facteur de puissance favorable, et la consommation énergétique globale s'élève à 9 482 Wh.

Pour la courbe montre un surplus de puissance suivie d'une stabilité autour 486w

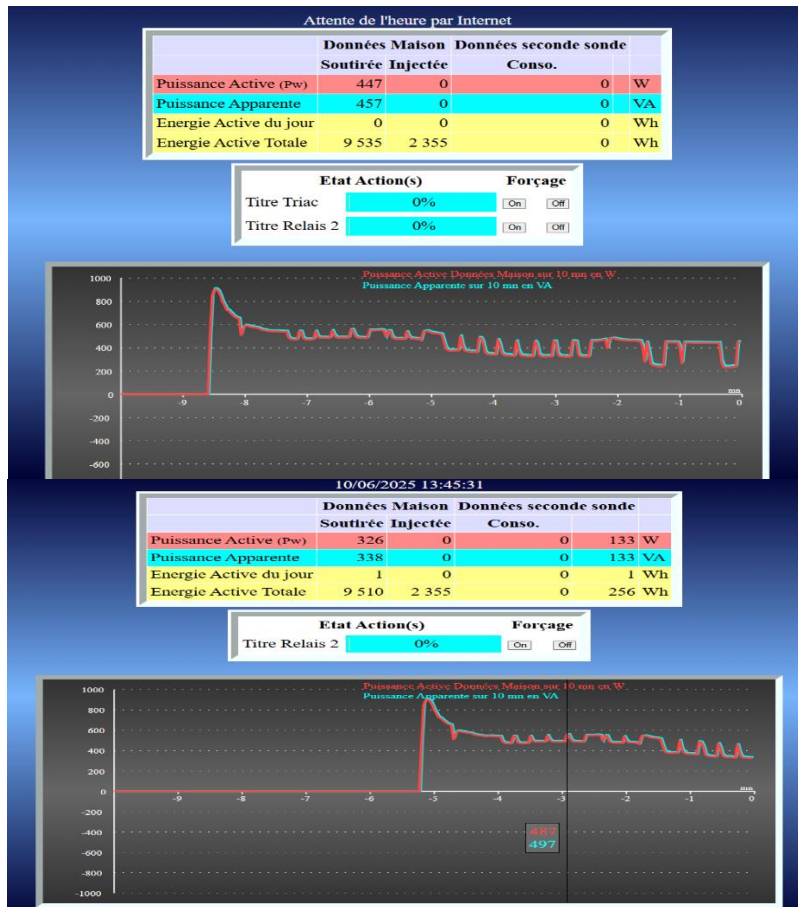


Figure IV.13:consommation électrique active

| Données brutes capteur JSY-MK-194T |        |    |
|------------------------------------|--------|----|
| <b>Données Maison</b>              |        |    |
| Tension efficace                   | 205.12 | V  |
| Courant efficace                   | 1.93   | A  |
| Puissance (Pw)                     | 386    | W  |
| Facteur de puissance               | 0.98   |    |
| Energie active soutirée            | 9 592  | Wh |
| Energie active injectée            | 2 355  | Wh |
| <b>Données seconde sonde</b>       |        |    |
| Tension efficace                   | 205.12 | V  |
| Courant efficace                   | 0.00   | A  |
| Puissance (Pw)                     | 0      | W  |
| Facteur de puissance               | 0.00   |    |
| Energie active consommée           | 0      | Wh |
| Energie active produite            | 263    | Wh |
| Fréquence                          | 49.98  | Hz |

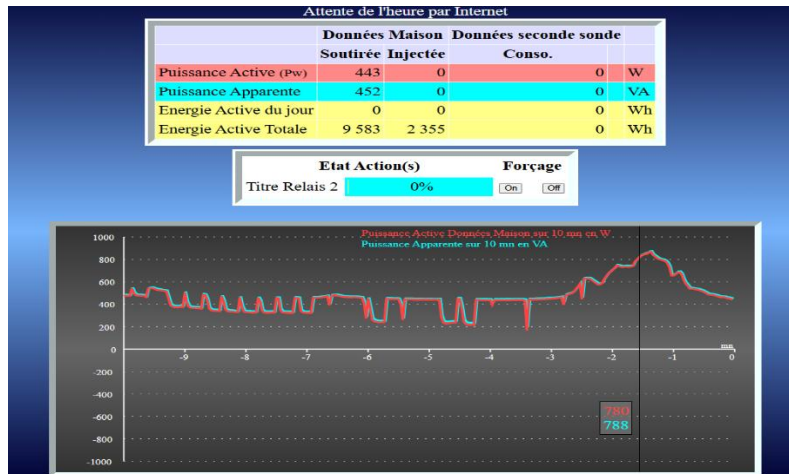


Figure IV.14:surplus des panneaux En prend la figure (9) et en vas faire une petite analyse :

Nous avons utiliser une charge supplémentaire de 500w qui est dans cette figure ci-dessus



Et en injecte un petit peux de l'énergie surplus des panneaux elle vas être 25%ensuite 50% ensuit 75% ainsi en vas soutirer de l'énergie par les panneaux et en vas pas le laisser ou réseau mais plutôt le consommé.

## **-Conclusion :**

En matière d'autoconsommation solaire, un déficit se produit lorsque la production ne satisfait pas à la demande de consommation, ce qui nécessite une utilisation du réseau.

En revanche, une surproduction se produit lorsque la production excède les demandes, et l'excès est soit réintroduit, soit gaspillé.

Le but est d'optimiser l'utilisation locale de l'énergie générée.

Cela contribue à diminuer la dépendance vis-à-vis du réseau tout en optimisant les économies.

### IV.4.1 Service ThingSpeak

La plateforme ThingSpeak incarne l'Internet des Objets (IoT) pour les développeurs, qui peuvent assembler, visualiser et analyser en temps réel les données provenant de capteurs ou autres sources. En connectant avec ThingSpeak, on peut concevoir des tableaux de bord, surveiller des tendances et déclencher des actions en fonction de certaines situations. ThingSpeak supporte différents protocoles de communication, qu'il s'agisse d'HTTP, d'MQTT ou de TCP/IP permettant une connexion aisée avec un large éventail de dispositifs connectés.[4] .

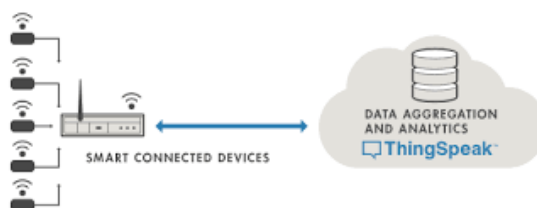


FIGURE IV.10 – ThingSpeak [26]

### IV.4.2 Configuration ThingsSpeak

ThingSpeak a été élaboré par MathWorks, la société ayant élaboré Matlab, environnement de développement numérique employé au sein des sciences et de l'ingénierie. Matlab permet de développer des algorithmes de traitement des données en lien avec des appareils IoT, pour ensuite les télécharger sur ThingSpeak pour les analyser et les visualiser.[35] .

Pour faire usage de ThingSpeak, la première chose à faire est de créer un compte et de configurer un canal pour chaque capteur utilisé. A ce stade, vous pouvez utiliser l'API ThingSpeak pour envoyer vos données de capteur vers votre canal et faire un affichage en temps réel de ces données sur le site Web de ThingSpeak. ThingSpeak permet également de configurer des alertes et des actions basées sur des événements en tirant parti des fonctionnalités de gestion de l'événement de ThingSpeak. [4].

Pour procéder au téléchargement des données dans ThingSpeak à des fins d'analyse et de traitement, vous devez créer votre compte et une chaîne. On suit les étapes suivantes :

- (a) Il faut ouvrir un compte sur le site de ThingSpeak.
- (b) Créer une nouvelle chaîne.
- (c) Noter la clé API d'écriture et l'ID de canal qui sont pourtant nécessaires pour récupérer les informations.
- (d) Les notes complètes sur son API d'interface REST sont disponibles dans sa documentation.

Les figures (IV.11),(IV.12),(IV.13),(IV.14) représentent la configurations de ce travail :

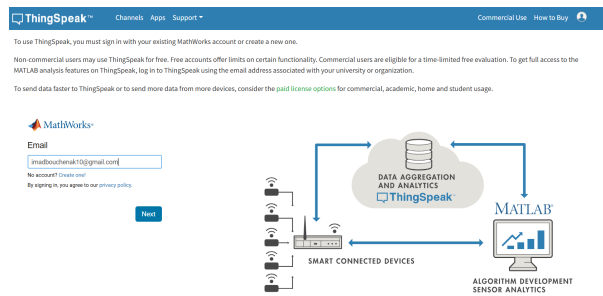


FIGURE IV.11 – Création compte sur ThingSpeak [26].

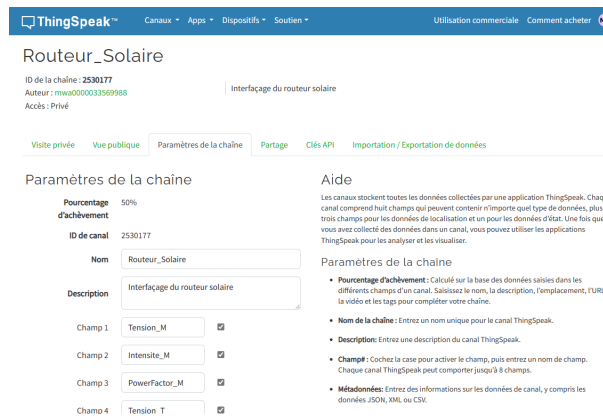


FIGURE IV.12 – Création d’une chaîne sur ThingSpeak

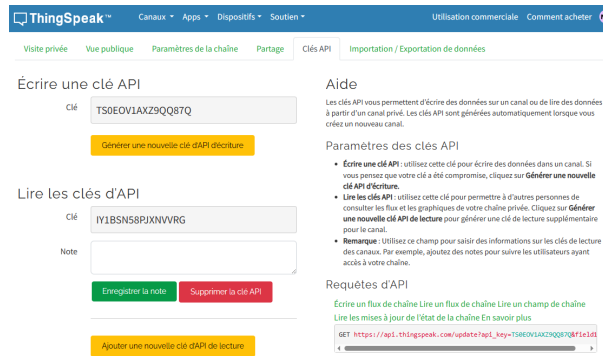


FIGURE IV.13 – Extraire API Key

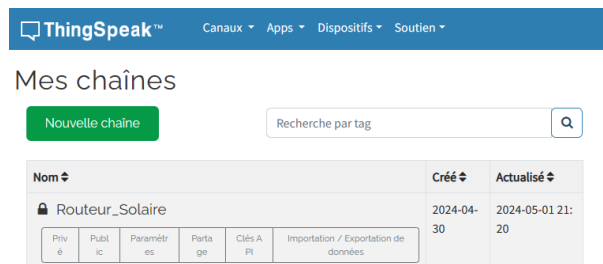


FIGURE IV.14 – L’interface du chaîne complet sous ThingSpeak

### IV.4.3 Résultats sous ThingsSpeak

Les résultats que nous avons obtenus avec ThingsSpeak nous fournissent un bon support visuel des données que nous avons recueillies à partir du code Arduino greffé à notre chaîne. Nous avons examiné avec des charges résistives de 15 % et bien jusqu'à 100 %. Les graphiques que nous avons obtenus montrent différentes mesures telles que le courant et la tension, la puissance et le facteur de puissance relevés tout au long de la journée du 17-06-2025. Cette visualisation améliorée des données doit sans aucun doute permettre d'analyser de manière plus fine les performances du système dans divers contextes de charge.

**En vas commencer par la partie déficit de la consommation pour déferante charge :**



Figure IV.15: déficit de 25% de charge

*En interprétation pour déficit 25%: La tension semble relativement stable après la montée initiale, mais avec des perturbations qui peuvent être dues à des variations de charge ou d'ensoleillement, pour l'intensité Le système fonctionne avec une faible consommation ou production en continu, mais des appels de courant ponctuels peuvent correspondre à des pics de charge ou à des surintensités transitoires, la charge peut varier entre résistive et légèrement inductive/capacitive. Le pic soudain peut correspondre à un changement brutal de charge.*



Figure IV.16: Déficit de 50% de charge

En déficit pour 50% de charge La tension monte rapidement au début, présente des fluctuations avec un creux significatif et reste globalement instable par la suite, Le facteur de puissance reste acceptable avec une élévation progressive, suivi d'un pic important qui coïncide avec le pic d'intensité, avant de redescendre et fluctuer. Les courbes indiquent une situation plus instable qu'auparavant, avec des variations plus importantes de tension et un pic de consommation marqué, ce qui pourrait signaler un déficit ou une surcharge ponctuelle dans le système.



Figure IV.17:déficit de 75% de charge

Pour 75% La tension présente des fluctuations importantes, avec deux hausses nettes suivies de baisses progressives et instables, L'intensité reste relativement stable avec un plateau à environ 4 A, suivi d'un pic soudain qui atteint environ 7 A, Le facteur de puissance évolue par paliers avec des pics significatifs, puis des baisses brutales, signalant des variations dans la qualité ou la nature des charges.

**Pour la 2ème consommation c'est la surproduction (surplus d'énergie)**

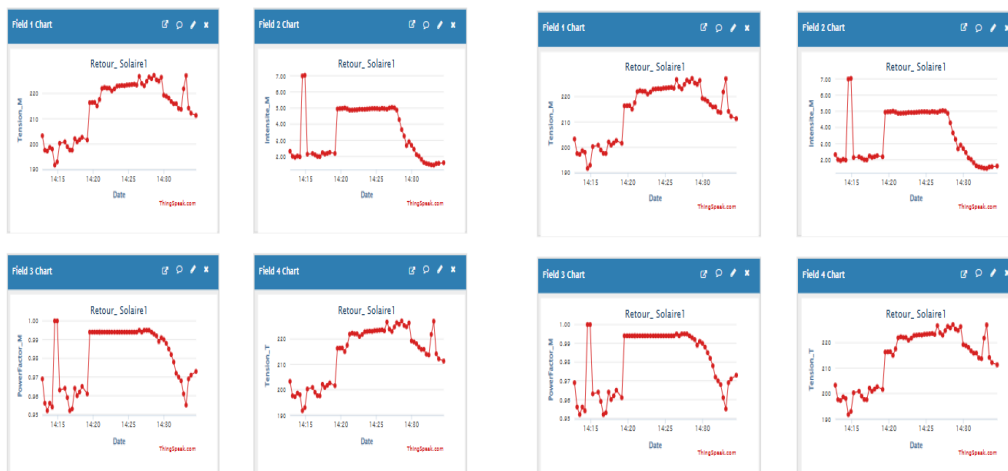


Figure IV.18:surplus de 50% de charge



Figure IV.19:surplus de 75% de charge



Figure IV.19:surplus de 100% de charge

Dans la première figure de charge 50% , on observe une chute rapide de la tension, de l'intensité et du facteur de puissance, indiquant une dégradation sévère du système et une perte progressive de la production. Les oscillations résiduelles traduisent une instabilité persistante. Dans la deuxième figure de charge 100%, le système démarre correctement avec une montée progressive de la tension et de l'intensité, atteignant une phase stable et efficace avec un bon facteur de puissance. La chute en fin de graphique suggère soit un arrêt normal, soit une coupure soudaine, en appel ça un surplus de puissance qui est générer par les panneaux et pas besoin du réseau

#### IV.5 Conclusion

La réalisation logicielle et l'interfaçage du routeur photovoltaïque constituent une étape essentielle dans l'aboutissement du système global. À travers ce chapitre, nous avons développé une architecture logicielle capable de traiter les mesures électriques (tension, courant, puissance), tout en assurant une visualisation en temps réel des données via différentes plateformes. L'interface web embarquée ainsi que l'intégration avec des services en ligne tels que ThingSpeak ont permis de rendre le système à la fois accessible, interactif et intelligent. Ces solutions assurent non seulement la surveillance à distance mais aussi une exploitation optimale de l'énergie solaire disponible. Ce volet logiciel complète ainsi la partie matérielle développée précédemment, et permet d'envisager une gestion énergétique plus performante et adaptable aux besoins futurs

## Conclusion générale

Dans un contexte où la transition énergétique devient une nécessité planétaire, l'exploitation des énergies renouvelables, et en particulier de l'énergie photovoltaïque, s'impose comme une solution durable et écologique. Ce mémoire a porté sur la conception et la réalisation d'un système intelligent d'autoconsommation basé sur l'énergie solaire, intégrant des fonctions de mesure, de contrôle et de surveillance en temps réel.

L'objectif principal de ce travail a été de développer un routeur photovoltaïque intelligent, capable d'optimiser l'utilisation locale de l'énergie produite, en évitant les pertes liées au stockage ou à l'injection non maîtrisée dans le réseau. Pour ce faire, une architecture matérielle a été mise en place autour d'un microcontrôleur ESP32, choisi pour ses capacités de traitement et de connectivité, associé à des capteurs de mesure (tension, courant), un module de commande (gradateur), et un affichage local via écran LCD.

Parallèlement, une interface logicielle embarquée a été développée pour assurer le calcul des puissances (active, apparente), le pilotage intelligent des charges, ainsi que la visualisation des données sur une page web locale et sur des plateformes en ligne comme ThingSpeak. Ces outils permettent une surveillance continue, à distance, et facilitent la prise de décision pour une meilleure gestion énergétique.

Les résultats obtenus ont démontré la faisabilité et la performance du système conçu, notamment en matière de réactivité, de précision de mesure et de flexibilité d'usage. Ce dispositif peut ainsi constituer une solution fiable pour des installations en sites isolés, ou comme complément dans un habitat domestique souhaitant réduire sa dépendance au réseau public.

Cependant, certaines limites subsistent, notamment en ce qui concerne la capacité de stockage, la gestion prédictive de la consommation, ou encore l'intégration à grande échelle dans des réseaux intelligents (smart grids). Des perspectives d'évolution pourraient inclure l'intégration d'intelligence artificielle pour l'optimisation prédictive, le développement d'algorithmes MPPT plus avancés, ou encore l'ajout de fonctionnalités domotiques pour automatiser davantage la gestion des charges.

En somme, ce travail a permis d'apporter une contribution concrète et applicable dans le domaine de l'autoconsommation photovoltaïque intelligente, en combinant simplicité technologique, efficacité énergétique, et accessibilité économique.

# Bibliographie

- [1] Photovoltaïque : fonctionnement et technologies. [https://document.environnement.brussels/opac\\_css/index.php?lvl=publisher\\_s&eid=1](https://document.environnement.brussels/opac_css/index.php?lvl=publisher_s&eid=1), 2011.
- [2] Vers les énergies renouvelables. <https://www.cairn.info/les-energies-renouvelables-9782130626350-page-11.htm?contenu=resume>, 2014.
- [3] Apprendre et comprendre "le triac". <https://emrecmic.wordpress.com/2017/02/07/le-triac/>, 2017.
- [4] 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.
- [5] Panneau photovoltaïque : qu'est-ce que c'est? <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-panneau-photovoltaïque-7973/description-dun-panneau-photovoltaïque>, 2020.
- [6] Les différentes architectures du solaire photovoltaïque. <https://www.solaire-offgrid.com/le-solaire-et-ses-applications/architectures-solaire-photovoltaïque/>, 2021.
- [7] Quelle est la puissance d'un panneau solaire photovoltaïque? <https://mypower.engie.fr/conseils/panneaux-solaires/caracteristiques-panneaux-solaires/puissance-panneau-solaire.html>, 2021.
- [8] Qu'est-ce que l'autoconsommation? <https://www.sirenergies.com/article/autoconsommation-efficacite-energetique-reduction-facture/>, 2021.
- [9] Qu'est-ce qu'un panneau photovoltaïque? définition simple., <https://mypower.engie.fr/conseils/panneaux-solaires/panneau-solaire-photovoltaïque/qu-est-ce-qu-un-panneau-photovoltaïque-definition-simple.html>, 2021.
- [10] Arduino ide. <https://robdomo.com/ressources/logiciels/ide-arduino/arduino-ide-1-8-19/>, 2022.
- [11] Le contrôleur spi. [https://esp32.arduino-forth.com/article/techRefs\\_PIcontroller](https://esp32.arduino-forth.com/article/techRefs_PIcontroller), 2022.
- [12] 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.
- [13] Kit solaire autoconsommation avec batterie - avel heol. <https://avelheol.fr/101-kit-solaire-autoconsommation-avec-batterie>, 2022.
- [14] Model railway by nitrathor. <https://www.nitrathor.fr/fiches/ide-arduino>, 2022.
- [15] Le bim dans la construction. <https://biblus.accasoftware.com/fr/les-differents-types-de-systemes-photovoltaïques-caracteristiques-et-avantages/>, 2023.
- [16] *Datasheet ESP32WROOM32*. Thèse de doctorat, 2023.
- [17] *Datasheet ESP32WROOM32*. Thèse de doctorat, 2023.
- [18] How to connect to a wifi network with the esp32. <https://www.upesy.com/blogs/tutorials/how-to-connect-wifi-access-point-with-esp32>, 2023.
- [19] le photovoltaïque éco-responsable. <https://www.civisol.fr/info/8-le-panneau-solaire-photovoltaïque> : :text=La

- [20] 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.
- [21] Onduleurs vs. micro-onduleurs : Comment choisir ? <https://sunteq.fr/connaissance-appfondie/onduleurs-vs-micro-onduleurs/>, 2023.
- [22] Quelles sont les caractéristiques d'un panneau solaire ? <https://www.jade-technologie.com/caracteristiques-dun-panneau-solaire/>, 2023.
- [23] Qu'est ce qu'un micro onduleur- allo solar. <https://allo.solar/base-de-connaissances/qu-est-ce-qu-un-micro-onduleur.html>, 2023.
- [24] Rendement des panneaux solaires : un guide complet. <https://www.engie-green.fr/enr/rendement-panneau-solaire/>, 2023.
- [25] Conversion d'énergie dans centrale solaire photovoltaïque-colibri solar. <https://www.colibri.solar/centrale-solaire-sol/quelle-conversion-energie-solaire-se-fait/>, 2024.
- [26] Thingspeak for iot. [https://thingspeak.com/pages/commercial\\_earn\\_more](https://thingspeak.com/pages/commercial_earn_more), 2024.
- [27] 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.
- [28] Grine ABDERRAHMANE : Etude caractéristique des panneaux photovoltaïque système arduino.
- [29] 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.
- [30] F1ATB ANDRÉ : Routeur photovoltaïque simple à réaliser. <https://f1atb.fr/fr/routeur-photovoltaique-simple-a-realiser/>, 2024.
- [31] ANDRÉ : Triacs gradateurs pour routeur photovoltaïque. <https://f1atb.fr/fr/triac-gradateur-pour-routeur-photovoltaique/>, 2023.
- [32] F1ATB ANDRÉ : capteur-linky. <https://f1atb.fr/fr/capteur-linky-pour-routeur-photovoltaique/>, 2024.
- [33] F1ATB ANDRÉ : capteur-shelly-em. <https://f1atb.fr/fr/capteur-shelly-em-pour-routeur-photovoltaique/>, 2024.
- [34] F1ATB ANDRÉ : Capteur uxix2 ou uxix3 pour routeur photovoltaïque. <https://f1atb.fr/fr/capteur-uxix2-pour-routeur-photovoltaique/>, 2024.
- [35] 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.
- [36] Cedric CABAL : *Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2008.
- [37] 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.

- [38] 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.
- [39] Rabiaa DJABRI : Vers une architecture solaire des résidences universitaire. 2017.
- [40] WALID DJAFRI : Composition des services dans l'internet des objets.
- [41] Adel ROZTANE et WEAM ALI MERINA : Utilisation des objets connectés dans la gestion efficace des poteaux incendie. 2022.
- [42] RIADH HAJJI : Utiliser les pins de la carte esp32. <https://apcpedagogie.com/utiliser-les-pins-de-la-carte-esp32/>, 2022.
- [43] Neil KOLBAN : *kolban-ESP32*. <https://archive.org/details/kolban-ESP32>, avril-2018.
- [44] KRAGG : Arsun, le routeur solaire en test sur notre blog. <https://blog.nord-domotique.com/test-arsun-routeur-solaire/>, 2023.
- [45] RIKIOUA.D LAZARI, MEBARKI et H Encadreur IDIR : *Étude d'un systèmes Photovoltaïque*. Thèse de doctorat, Université A.MIRA de Bejaïa, 2014.
- [46] L.DESFORGES : *Autoconsommation photovoltaïque : évaluation des enjeux pour le réseau électrique*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2017.
- [47] 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.
- [48] Antar Beddar LINDA HASSAINE, Issam Abadlia : Contrôle avancé des onduleurs photovoltaïques connectés au réseau. *Journal of Renewable Energies*, page 181–201, 2021.
- [49] 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.
- [50] Saad MOTAHHIR, Abdelaziz EL GHIZAL 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.
- [51] Belaid Lalouni SOFIA : Cours énergie solaire photovoltaïque. *Université A. Mira de Bejaia*, 2015.
- [52] 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.
- [53] Ravi TEJA : Brochage esp32 et brochage esp wroom 32. <https://www.electronicshub.org/esp32-pinout/>, 2024.
- [54] Zolikha ZERROUKI et Rym BEREKSI REGUIG : *Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome*. Thèse de doctorat, 2017.

# Annexe A

## B.4. Caractéristiques du transformateur de tension 220V/6V

- Rapport de transformation
- Puissance nominale
- Isolation
- Fréquence

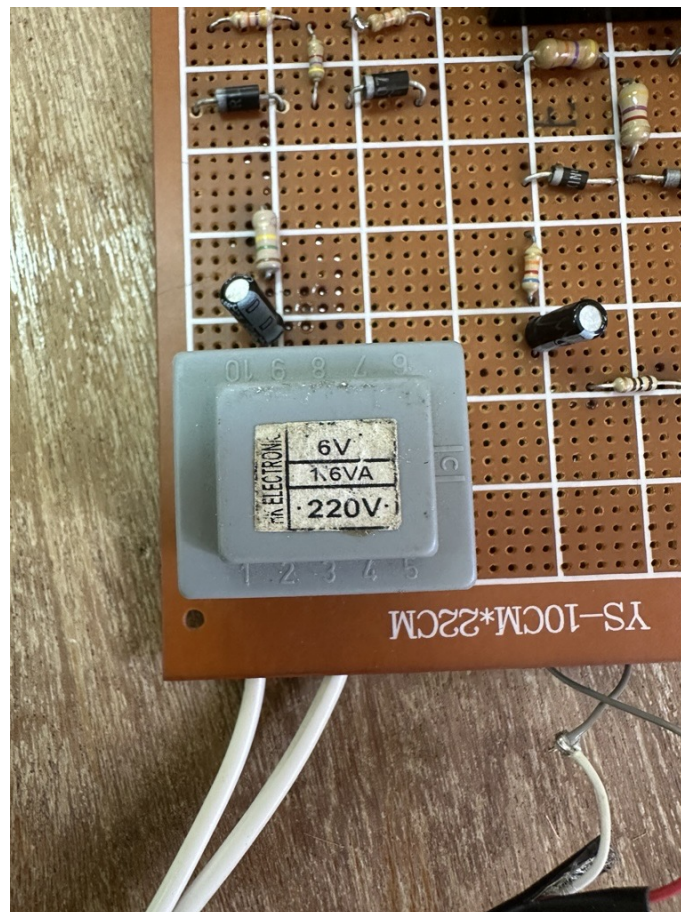


FIGURE 19 – Caractéristiques du transformateur de tension 220V/6V

## B.4. Voici quelques-unes de ses principales caractéristiques : ESP32

- Puissance de traitement
- Connectivité sans fil
- Sécurité
- Faible consommation d'énergie



FIGURE 20

## 2.1 Pin Layout

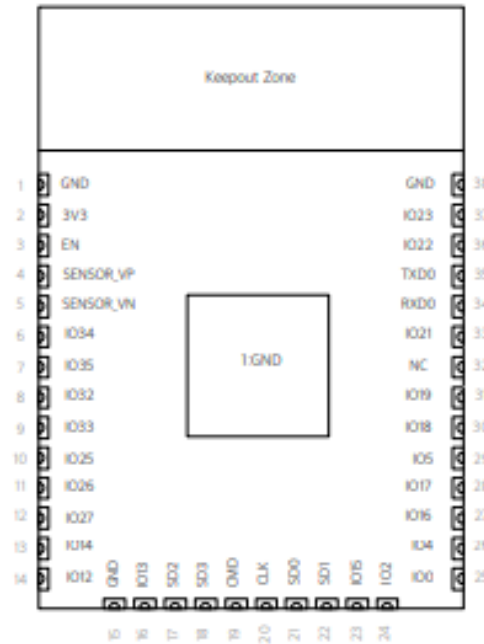


Figure 1: ESP32-WROOM-32 (ESP-WROOM-32) Pin layout

## 2.2 Pin Description

ESP32-WROOM-32 (ESP-WROOM-32) has 38 pins. See pin definitions in Table 2.

Table 2: Pin Definitions

| Name      | No. | Type | Function                                                                               |
|-----------|-----|------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| GND       | 1   | P    | Ground                                                                                 |
| 3V3       | 2   | P    | Power supply.                                                                          |
| EN        | 3   | I    | Chip-enable signal. Active high.                                                       |
| SENSOR_VP | 4   | I    | GPIO36, SENSOR_VP, ADC1_H, ADC1_CH0, RTC_GPIO0                                         |
| SENSOR_VN | 5   | I    | GPIO39, SENSOR_VN, ADC1_CH3, ADC_H, RTC_GPIO3                                          |
| IO34      | 6   | I    | GPIO34, ADC1_CH6, RTC_GPIO4                                                            |
| IO35      | 7   | I    | GPIO35, ADC1_CH7, RTC_GPIO5                                                            |
| IO32      | 8   | I/O  | GPIO32, XTAL_32K_P (32.768 kHz crystal oscillator input), ADC1_CH4, TOUCH9, RTC_GPIO9  |
| IO33      | 9   | I/O  | GPIO33, XTAL_32K_N (32.768 kHz crystal oscillator output), ADC1_CH5, TOUCH8, RTC_GPIO8 |
| IO25      | 10  | I/O  | GPIO25, DAC_1, ADC2_CH8, RTC_GPIO6, EMAC_RXD0                                          |
| IO26      | 11  | I/O  | GPIO26, DAC_2, ADC2_CH9, RTC_GPIO7, EMAC_RXD1                                          |
| IO27      | 12  | I/O  | GPIO27, ADC2_CH7, TOUCH7, RTC_GPIO17, EMAC_RX_DV                                       |

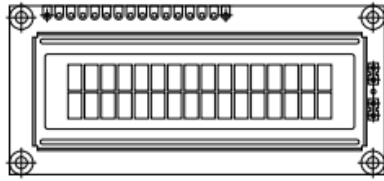
FIGURE 21

| Name     | No. | Type | Function                                                                           |
|----------|-----|------|------------------------------------------------------------------------------------|
| IO14     | 13  | I/O  | GPIO14, ADC2_CH6, TOUCH6, RTC_GPIO16, MTMS, HSPICLK, HS2_CLK, SD_CLK, EMAC_TXD2    |
| IO12     | 14  | I/O  | GPIO12, ADC2_CH5, TOUCH5, RTC_GPIO15, MTDI, HSPIQ, HS2_DATA2, SD_DATA2, EMAC_TXD3  |
| GND      | 15  | P    | Ground                                                                             |
| IO13     | 16  | I/O  | GPIO13, ADC2_CH4, TOUCH4, RTC_GPIO14, MTCK, HSPID, HS2_DATA3, SD_DATA3, EMAC_RX_ER |
| SHD/SD2* | 17  | I/O  | GPIO9, SD_DATA2, SPIHD, HS1_DATA2, U1RXD                                           |
| SWP/SD3* | 18  | I/O  | GPIO10, SD_DATA3, SPIWP, HS1_DATA3, U1TXD                                          |
| SCS/CMD* | 19  | I/O  | GPIO11, SD_CMD, SPICS0, HS1_CMD, U1RTS                                             |
| SCK/CLK* | 20  | I/O  | GPIO6, SD_CLK, SPICLK, HS1_CLK, U1CTS                                              |
| SDO/SD0* | 21  | I/O  | GPIO7, SD_DATA0, SPIQ, HS1_DATA0, U2RTS                                            |
| SDI/SD1* | 22  | I/O  | GPIO8, SD_DATA1, SPID, HS1_DATA1, U2CTS                                            |
| IO15     | 23  | I/O  | GPIO15, ADC2_CH3, TOUCH3, MTDO, HSPICS0, RTC_GPIO13, HS2_CMD, SD_CMD, EMAC_RXD3    |
| IO2      | 24  | I/O  | GPIO2, ADC2_CH2, TOUCH2, RTC_GPIO12, HSPWP, HS2_DATA0, SD_DATA0                    |
| IO0      | 25  | I/O  | GPIO0, ADC2_CH1, TOUCH1, RTC_GPIO11, CLK_OUT1, EMAC_TX_CLK                         |
| IO4      | 26  | I/O  | GPIO4, ADC2_CH0, TOUCH0, RTC_GPIO10, HSPHD, HS2_DATA1, SD_DATA1, EMAC_TX_ER        |
| IO16     | 27  | I/O  | GPIO16, HS1_DATA4, U2RXD, EMAC_CLK_OUT                                             |
| IO17     | 28  | I/O  | GPIO17, HS1_DATA5, U2TXD, EMAC_CLK_OUT_180                                         |
| IO5      | 29  | I/O  | GPIO5, VSPICS0, HS1_DATA6, EMAC_RX_CLK                                             |
| IO18     | 30  | I/O  | GPIO18, VSPICLK, HS1_DATA7                                                         |
| IO19     | 31  | I/O  | GPIO19, VSPIQ, U0CTS, EMAC_TXD0                                                    |
| NC       | 32  | -    | -                                                                                  |
| IO21     | 33  | I/O  | GPIO21, VSPIHD, EMAC_TX_EN                                                         |
| RXD0     | 34  | I/O  | GPIO3, U0RXD, CLK_OUT2                                                             |
| TXD0     | 35  | I/O  | GPIO1, U0TXD, CLK_OUT3, EMAC_RXD2                                                  |
| IO22     | 36  | I/O  | GPIO22, VSPWP, U0RTS, EMAC_TXD1                                                    |
| IO23     | 37  | I/O  | GPIO23, VSPID, HS1_STROBE                                                          |
| GND      | 38  | P    | Ground                                                                             |

FIGURE 22

# Annexe B

## 16 x 2 Character LCD



### FEATURES

- Type: Character
- Display format: 16 x 2 characters
- Built-in controller: ST 7066 (or equivalent)
- Duty cycle: 1/16
- 5 x 8 dots includes cursor
- + 5 V power supply
- LED can be driven by pin 1, pin 2, or A and K
- N.V. optional for + 3 V power supply
- Optional: Smaller character size (2.95 mm x 4.35 mm)
- Material categorization: For definitions of compliance please see [www.vishay.com/doc?99912](http://www.vishay.com/doc?99912)



| MECHANICAL DATA  |                           |      |
|------------------|---------------------------|------|
| ITEM             | STANDARD VALUE            | UNIT |
| Module Dimension | 80.0 x 36.0 x 13.2 (max.) | mm   |
| Viewing Area     | 66.0 x 16.0               |      |
| Dot Size         | 0.55 x 0.65               |      |
| Dot Pitch        | 0.60 x 0.70               |      |
| Mounting Hole    | 75.0 x 31.0               |      |
| Character Size   | 2.95 x 5.55               |      |

| ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS |                      |                |      |          |      |
|--------------------------|----------------------|----------------|------|----------|------|
| ITEM                     | SYMBOL               | STANDARD VALUE |      |          | UNIT |
|                          |                      | MIN.           | TYP. | MAX.     |      |
| Power Supply             | $V_{DD}$ to $V_{SS}$ | - 0.3          | -    | 13       | V    |
| Input Voltage            | $V_I$                | $V_{SS}$       | -    | $V_{DD}$ |      |

### Note

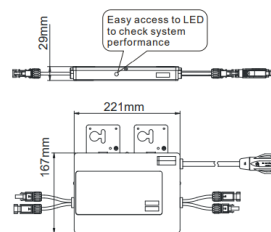
- $V_{SS} = 0$  V,  $V_{DD} = 5.0$  V

| ELECTRICAL CHARACTERISTICS                                           |                   |                                         |                |      |      |      |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------|----------------|------|------|------|
| ITEM                                                                 | SYMBOL            | CONDITION                               | STANDARD VALUE |      |      | UNIT |
|                                                                      |                   |                                         | MIN.           | TYP. | MAX. |      |
| Input Voltage                                                        | $V_{DD}$          | $V_{DD} = + 5$ V                        | 4.5            | 5.0  | 5.5  | V    |
| Supply Current                                                       | $I_{DD}$          | $V_{DD} = + 5$ V                        | 1.0            | 1.2  | 1.5  | mA   |
| Recommended LC Driving Voltage for Normal Temperature Version Module | $V_{DD}$ to $V_0$ | - 20 °C                                 | -              | -    | 5.2  | V    |
|                                                                      |                   | 0 °C                                    | -              | -    | -    |      |
|                                                                      |                   | 25 °C                                   | -              | 3.7  | -    |      |
|                                                                      |                   | 50 °C                                   | -              | -    | -    |      |
|                                                                      |                   | 70 °C                                   | 3.1            | -    | -    |      |
| LED Forward Voltage                                                  | $V_F$             | 25 °C                                   | -              | 4.2  | 4.6  | V    |
| LED Forward Current - Array                                          | $I_F$             | 25 °C                                   | -              | 100  | -    | mA   |
| LED Forward Current - Edge                                           |                   |                                         | -              | 20   | 40   |      |
| EL Power Supply Current                                              | $I_{EL}$          | $V_{EL} = 110$ V <sub>AC</sub> , 400 Hz | -              | -    | 5.0  | mA   |

| DISPLAY CHARACTER ADDRESS CODE |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Display Position               |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|                                | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| DD RAM Address                 | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 0A | 0B | 0C | 0D | 0E | 0F |
| DD RAM Address                 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 4A | 4B | 4C | 4D | 4E | 4F |

FIGURE 23

## DIMENSIONS



Our flagship product, the APsystems YC500I is a grid-tied microinverter with intelligent networking and monitoring systems to ensure maximum efficiency. Highly dependable and cost effective, the YC500I delivers 250W AC per module with dual MPPT. Half the inverters and half the installation means real cost savings for residential and commercial customers.

FIGURE 24

## YC500I Microinverter Datasheet

|                                        |                                                    |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>Region</b>                          | Sri Lanka                                          |
| <b>Model</b>                           | YC500I-LK                                          |
| <b>Input Data (DC)</b>                 |                                                    |
| MPPT Voltage Range                     | 22V-45V                                            |
| Operation Voltage Range                | 16V-52V                                            |
| Maximum Input Voltage                  | 55V                                                |
| Startup Voltage                        | 22V                                                |
| Maximum Input Current                  | 10.5Ax 2                                           |
| <b>Output Data (AC)</b>                |                                                    |
| Maximum Output Power                   | 500W                                               |
| Nominal Output Voltage                 | 230V                                               |
| Nominal Output Current                 | 2.17A                                              |
| Default/Protect Output Voltage Range   | 195.5V-253V*                                       |
| Extended/Output Voltage Range          | 149-278V                                           |
| Nominal Output Frequency               | 50Hz                                               |
| Default/Protect Output Frequency Range | 49Hz-51Hz*                                         |
| Extended/Output Frequency Range        | 45.1-54.9Hz                                        |
| Power Factor                           | >0.99                                              |
| Total Harmonic Distortion              | <3%                                                |
| Maximum Units per Branch               | 9 for 20 Breaker**                                 |
| <b>Efficiency</b>                      |                                                    |
| Max. Inverter Efficiency               | 95.5%                                              |
| Night Power Consumption                | 120mW                                              |
| <b>Mechanical Data</b>                 |                                                    |
| Operating Ambient Temperature Range    | -40 °F to +149 °F (-40 °C to +65 °C)               |
| Storage Temperature Range              | -40 °F to +185 °F (-40 °C to +85 °C)               |
| Dimensions (W x H x D)                 | 221mm X 167mm X 29mm (8.7" x 6.6" x 1.1")          |
| Weight                                 | 5.5lbs/2.5kg                                       |
| Enclosure Rating                       | IP67                                               |
| Cooling                                | Natural Convection - No Fans                       |
| <b>Features &amp; Compliance</b>       |                                                    |
| Communication (Inverter To ECU)        | Power Line Communication                           |
| Monitoring                             | Via EMA**Software                                  |
| Transformer Design                     | High Frequency Transformers, Galvanically Isolated |
| Grid Connection Compliance             | IEC 61727                                          |

FIGURE 25

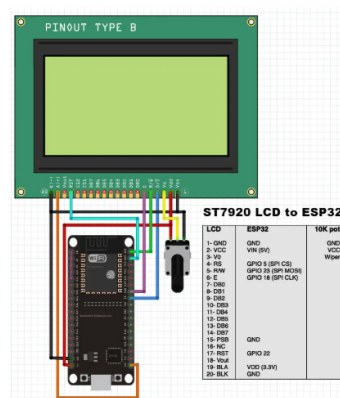


FIGURE 26

## 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 relié avec la base de thingspeak 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, Thingspeak, donnée en temps réel.

## 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 thingspeak based 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, donnée en temps réel.

## ملخص

نلخص 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 ESP 32 ولوحة مضيفة من طراز 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 ، thingspeak قاعدة البيانات الزمنية.