

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES**



Faculté de Technologie

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

**Mémoire de Master**

Présenté par

**BENHADJ TAHAR Billel**

**LEKNOUCHE Noureddine**

**Filière : Electronique**

**Spécialité : Electronique des Systèmes Embarqués**

---

**Compteur intelligent d'énergie électrique produite par les  
générateurs photovoltaïques**

---

**Soutenu en juillet 2022 devant le jury composé de :**

KESSAISSIA	Karima	MAA	UMBB	Présidente
MILOUDI	Lalia	MCB	UMBB	Examinatrice
KAOUANE	Mohamed	MCB	UMBB	Rapporteur

Année Universitaire : 2021/2022

## *Dédicace*

*À nos parents,*

*À nos frères et sœurs,*

*À nos amis et camarades*

*LEKNOUCHE Nouredine*

*BILLEL BENHADJ Tahar*

## ***Remerciements***

*Nous remercions tout d'abord Monsieur **M. Kaouane** notre encadreur pour avoir dirigé ce travail et pour son aide depuis le début jusqu'à la fin du projet.*

*Nous tenons à remercier en second lieu les membres de jury Madame **K. Kessaissia** et madame **L. Miloudi** d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

*Enfin nous remercions toute personne qui a participé de près ou de loin à la réussite de ce travail.*

## Résumé

L'objectif de ce travail est de concevoir un compteur intelligent d'énergie électrique produite par les générateurs photovoltaïques afin de surveiller leur performance et fonctionnement. Le compteur proposé est basé sur la carte Raspberry Pi Pico qui utilise les données provenant du capteur de courant et de tension "INA219" pour calculer la puissance et compter l'énergie produite puis enregistrer les données de la production sous forme de journaux dans la mémoire interne. Il a été branché à un système photovoltaïque autonome afin de valider son bon fonctionnement et de réaliser des tests de précision qui ont donné des erreurs relatives proportionnelles aux courants mesurés. Un algorithme de correction a été implémenté pour remédier ce problème.

**Mots clés :** compteur intelligent, générateur photovoltaïque, Raspberry Pi Pico, capteur de courant et de tension, système photovoltaïque autonome.

## Abstract

The objective of this work is to design a smart meter of electrical energy produced by photovoltaic generators in order to monitor their performance and operation. The proposed meter is based on the Raspberry Pi Pico board that uses data from the "INA219" current and voltage sensor to calculate the power and count the energy produced, then saves production data as logs to the internal memory. It was connected to an off-grid photovoltaic system in order to validate its proper operation and to perform accuracy tests, which gave relative errors proportional to the measured currents. A correction algorithm has been implemented to fix this problem.

**Keywords:** smart meter, photovoltaic generator, Raspberry Pi Pico, current and voltage sensor, off-grid photovoltaic system.

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو تصميم عداد ذكي للطاقة الكهربائية التي تنتجها المولدات الكهروضوئية من أجل مراقبة أدائها. يعتمد العداد المقترح على لوحة راسبيري باي بيكو (Raspberry Pi Pico) التي تستخدم البيانات من مستشعر التيار والجهد "INA219" لحساب الاستطاعة و الطاقة المنتجة، ثم تحفظ بيانات الإنتاج على شكل سجلات في الذاكرة الداخلية. تم توصيل العداد بنظام كهروضوئي مستقل للتحقق من حسن عمله وإجراء اختبارات الدقة، والتي أعطت أخطاء نسبية تتناسب طرذا مع التيارات المقاسة. تم تطبيق خوارزمية تصحيح لإصلاح هذه المشكلة.

**كلمات مفتاحية:** عداد ذكي، مولد كهروضوئي، راسبيري باي بيكو، مستشعر التيار والجهد، نظام كهروضوئي مستقل.

# Sommaire

Dédicace	
Remerciements	
Résumé	
Sommaire	
Listes des figures et des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale .....	1

## **Chapitre 1 Généralités sur les systèmes de conversion photovoltaïque**

1.1 Introduction .....	2
1.2 L'énergie solaire .....	2
1.3 L'effet photovoltaïque .....	2
1.4 La Cellule Photovoltaïque.....	3
1.4.1 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque .....	3
1.4.2 Modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque.....	4
1.5 Caractéristique de la cellule Photovoltaïque .....	5
1.6 Effet de l'éclairement et de la température .....	6
1.7 Le Générateur Photovoltaïque .....	7
1.8 Groupement des modules photovoltaïques .....	8
1.8.1 Groupement en série .....	8
1.8.2 Groupement en parallèle .....	9
1.8.3 Groupement mixte (Série Parallèle) .....	10
1.9 Les systèmes de conversion photovoltaïque .....	10
1.9.1 Systèmes autonomes .....	10
1.9.2 Systèmes connectés au réseau.....	12
1.9.3 Systèmes hybrides.....	12
1.10 Protection des modules photovoltaïques.....	13
1.10.1 Protection des systèmes photovoltaïques contre la foudre .....	15
1.11 Conclusion .....	16

## **Chapitre 2 Les compteurs d'énergie électrique**

2.1 Introduction .....	17
2.2 Historique et évolution du compteur d'énergie électrique .....	17
2.2.1 Le compteur électrolytique .....	17
2.2.2 Le compteur électromécanique .....	18

2.2.3 Le compteur électronique .....	19
2.2.4 Le compteur intelligent .....	20
2.3 Principe de fonctionnement du compteur intelligent .....	20
2.3.1 Alimentation .....	21
2.3.2 Capteur de tension.....	21
2.3.3 Capteur de courant .....	22
2.3.3.1 Capteur à résistance de shunt.....	22
2.3.3.2 Capteur à Transformateur de courant .....	22
2.3.3.3 Capteur à effet Hall.....	23
2.3.4 Microcontrôleur .....	24
2.3.5 Unité de communication .....	25
2.3.5.1 GSM .....	25
2.3.5.2 WIFI .....	25
2.3.5.3 Le réseau maillé sans fil .....	26
2.3.6 Interface d'affichage .....	26
2.3.7 Commande de disjoncteur .....	27
2.3.8 Module de sécurité.....	27
2.3.9 RTC.....	27
2.4 Avantages du compteur intelligent .....	28
2.5 Conclusion .....	29

### **Chapitre 3 Etapes de conception d'un compteur d'énergie électrique produite par les générateurs photovoltaïques**

3.1 Introduction.....	30
3.2 Système photovoltaïque autonome proposé.....	30
3.2.1 Module photovoltaïque .....	30
3.2.2 Contrôleur de charge.....	31
3.2.2.1 Entrées et sorties.....	31
3.2.2.2 Spécifications techniques .....	32
3.2.2.3 Modes de fonctionnement .....	32
3.2.3 Batterie plomb-acide.....	33
3.3 Description de l'architecture Hardware proposée du compteur d'énergie .....	34
3.3.1 Raspberry Pi Pico.....	35
3.3.2 Capteur INA219 .....	36
3.3.3 L'Afficheur OLED SH1106.....	38
3.3.4 L'abaisseur de tension DSN-MINI-360.....	38
3.3.5 Communication via USB .....	39
3.3.6 Le diviseur de tension et la LED RGB .....	40

3.3.7 Les autres composants .....	40
3.4 Présentation de l'outil de programmation.....	40
3.4.1 L'interface graphique .....	40
3.4.2 Installation du micrologiciel de MicroPython sur Raspberry Pi Pico.....	41
3.5 Affichage des paramètres instantanés, (tension, courant et puissance générée).....	42
3.6 Algorithme de comptage et affichage d'énergie.....	44
3.6.1 Comptage d'énergie .....	45
3.6.2 Affichage d'énergie avec option .....	46
3.7 Réalisation du compteur .....	47
3.7.1 Utilisation de la plaque d'essai .....	47
3.7.2 Conception du circuit imprimé (PCB) .....	47
3.7.3 Soudage des composants et assemblage dans un boîtier .....	49
3.8 Conclusion .....	50

## **Chapitre 4 Tests expérimentaux et validation des résultats**

4.1 Introduction .....	51
4.2 Mesures électriques sur le système photovoltaïque.....	51
4.2.1 Mesure de la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et du courant en court-circuit ( $I_{cc}$ ).....	51
4.2.2 Influence de l'inclinaison et de l'orientation sur $I_{cc}$ .....	52
4.2.2.1 Influence de l'inclinaison.....	52
4.2.2.2 Influence de l'orientation .....	52
4.2.3 Mesure de $I_{cc}$ et $V_{co}$ en branchement série et en branchement parallèle .....	52
4.2.4 Branchement du Système.....	54
4.3 Branchement du compteur au système .....	55
4.4 Tests sous différentes conditions .....	55
4.4.1 Test de l'indicateur "batterie faible" (LED RGB) .....	55
4.4.2 Test de la précision du compteur .....	56
4.4.3 Mesure de $V_{pv}$ (Tension des modules photovoltaïques) et $I_{pv}$ (Courant des modules photovoltaïques) de deux modules branchés en parallèle avec différentes charges électriques .....	60
4.4.4 Journal de $E_{minute}$ pendant une heure .....	62
4.5 Conclusion .....	63
Conclusion générale .....	64

Bibliographie

Annexes

## *Listes des figures et des tableaux*

## Liste des figures

<b>Figure 1.1</b> : L'effet photovoltaïque .....	3
<b>Figure 1.2</b> : La Cellule PV .....	3
<b>Figure 1.3</b> : Fonctionnement de la Cellule photovoltaïque .....	4
<b>Figure 1.4</b> : Modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque .....	4
<b>Figure 1.5</b> : Caractéristique I-V (courant-tension) de la cellule photovoltaïque .....	6
<b>Figure 1.6</b> : Caractéristique P-V (puissance-tension) de la cellule photovoltaïque .....	6
<b>Figure 1.7</b> : Influence de la température sur la caractéristique P-V (puissance-tension) .....	7
<b>Figure 1.8</b> : Influence de l'éclairement sur la caractéristique P-V (puissance-tension) .....	7
<b>Figure 1.9</b> : Module Photovoltaïque .....	8
<b>Figure 1.10</b> : Groupement des modules en série.....	8
<b>Figure 1.11</b> : Influence de l'association des modules en série sur la caractéristique I-V .....	9
<b>Figure 1.12</b> : Groupement parallèle des modules .....	9
<b>Figure 1.13</b> : Influence de l'association des modules en parallèle sur la caractéristique I-V ..	9
<b>Figure 1.14</b> : Branchement Mixte .....	10
<b>Figure 1.15</b> : Influence de l'association mixte des modules sur la caractéristique I-V .....	10
<b>Figure 1.16</b> : Schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage.....	11
<b>Figure 1.17</b> : Schéma synoptique d'un système PV connecté au réseau .....	12
<b>Figure 1.18</b> : Schéma synoptique d'un système hybride (PV et autres sources) .....	13
<b>Figure 1.19</b> : Protection des modules photovoltaïques .....	14
<b>Figure 1.20</b> : Effet de la diode by-pass sur la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque .....	14
<b>Figure 1.21</b> : Schéma de la mise à la terre d'une installation avec coffret DC et AC distincts .....	15
<b>Figure 1.22</b> : Parafoudre triphasé.....	15
<b>Figure 1.23</b> : Installation d'un paratonnerre sur la terrasse d'une maison .....	16
<b>Figure 2.1</b> : Evolution du compteur d'énergie électrique .....	17
<b>Figure 2.2</b> : Compteur électrolytique de Thomas Edison .....	18
<b>Figure 2.3</b> : Le compteur électromécanique de Schallentberger .....	18
<b>Figure 2.4</b> : Schéma interne d'un compteur électromécanique .....	19
<b>Figure 2.5</b> : Compteur électronique moderne. ....	19
<b>Figure 2.6</b> : Le compteur intelligent Linky déployé par l'entreprise Enedis en France .....	20
<b>Figure 2.7</b> : Structure matérielle d'un compteur intelligent .....	20
<b>Figure 2.8</b> : Exemple d'un abaisseur de tension DC-DC .....	21
<b>Figure 2.9</b> : Circuit pont diviseur de tension .....	21
<b>Figure 2.10</b> : Circuit d'un capteur à résistance de shunt .....	22
<b>Figure 2.11</b> : Schéma de principe d'un transformateur de courant .....	23
<b>Figure 2.12</b> : Capteur de courant à effet Hall en boucle ouverte .....	24
<b>Figure 2.13</b> : Capteur de courant à effet Hall en boucle fermée .....	24
<b>Figure 2.14</b> : Exemple d'un microcontrôleur.....	24
<b>Figure 2.15</b> : Exemple d'un module GSM.....	25
<b>Figure 2.16</b> : Exemple d'un module Wifi .....	26
<b>Figure 2.17</b> : Schéma simplifié d'un réseau maillé sans fil des compteurs intelligents .....	26

<b>Figure 2.18</b> : Exemple d'un afficheur LCD .....	27
<b>Figure 2.19</b> : Exemple d'une RTC (Vue dessus et dessous).....	28
<b>Figure 3.1</b> : Schéma bloc du système photovoltaïque autonome proposé .....	30
<b>Figure 3.2</b> : Contrôleur de charge utilisé dans notre système (LS102460LPLI) .....	31
<b>Figure 3.3</b> : Entrées et sorties de contrôleur de charge "LS102460LPLI" .....	31
<b>Figure 3.4</b> : Connexion des composants au contrôleur de charge "LS102460LPLI" .....	32
<b>Figure 3.5</b> : Mode de fonctionnement par défaut du contrôleur de charge"LS102460LPLI" .....	33
<b>Figure 3.6</b> : La batterie plomb-acide utilisée dans notre système .....	33
<b>Figure 3.7</b> : Schéma bloc de l'architecture hardware du compteur proposé .....	34
<b>Figure 3.8</b> : Schéma de branchement de l'architecture du circuit proposé .....	34
<b>Figure 3.9</b> : Brochage du Raspberry Pi Pico.....	35
<b>Figure 3.10</b> : Schéma interne de l'INA219.....	36
<b>Figure 3.11</b> : Le module utilisé de l'INA219 .....	37
<b>Figure 3.12</b> : Résistance shunt de 0.01 Ohm .....	37
<b>Figure 3.13</b> : Image de l'afficheur OLED SH1106.....	38
<b>Figure 3.14</b> : L'abaisseur de tension DSN-MINI-360 .....	38
<b>Figure 3.15</b> : Fichier log_de_Eminute.txt ouvert sur Thonny .....	39
<b>Figure 3.16</b> : Graphe de Eminute pendant 14 minutes .....	39
<b>Figure 3.17</b> : Interface graphique de Thonny .....	40
<b>Figure 3.18</b> : Icônes de Thonny .....	41
<b>Figure 3.19</b> : Version de Python sur Thonny.....	41
<b>Figure 3.20</b> : Choix de la carte sur Thonny .....	41
<b>Figure 3.21</b> : Boîte de dialogue pour installer le firmware de MicroPython .....	42
<b>Figure 3.22</b> : Message sur l'interface système après l'installation du firmware de MicroPython .....	42
<b>Figure 3.23</b> : Algorithme pour afficher la tension, le courant et la puissance .....	43
<b>Figure 3.24</b> : Affichage de la tension, le courant et la puissance sur l'afficheur OLED .....	44
<b>Figure 3.25</b> : Algorithme de comptage d'énergie .....	45
<b>Figure 3.26</b> : Algorithme d'affichage d'énergie avec option.....	46
<b>Figure 3.27</b> : Affichage d'énergie sur l'afficheur OLED avec option de basculement .....	47
<b>Figure 3.28</b> : Branchement finale des composants de compteur sur la plaque d'essai.....	47
<b>Figure 3.29</b> : Schéma électronique de notre compteur sous KiCad.....	48
<b>Figure 3.30</b> : Circuit imprimé du compteur conçu sous KiCad.....	48
<b>Figure 3.31</b> : Soudage des composants et des jumpers sur le circuit imprimé .....	49
<b>Figure 3.32</b> : Assemblage des composants dans un boîtier .....	49
<b>Figure 4.1</b> : Mesure de $V_{co}$ et $I_{cc}$ d'un seul module photovoltaïque incliné de $45^\circ$ .....	51
<b>Figure 4.2</b> : Deux modules photovoltaïques inclinés de $\sim 45^\circ$ .....	53
<b>Figure 4.3</b> : Branchement en série des deux modules photovoltaïques .....	53
<b>Figure 4.4</b> : Connecteur MC4 utilisé pour brancher les deux modules photovoltaïques en parallèle .....	53
<b>Figure 4.5</b> : Branchement en parallèle des deux modules photovoltaïques .....	54
<b>Figure 4.6</b> : Branchement du système photovoltaïque .....	55
<b>Figure 4.7</b> : Branchement du compteur au système .....	55
<b>Figure 4.8</b> : Test de l'indicateur "batterie faible" (LED RGB).....	56
<b>Figure 4.9</b> : Banc d'essais dans le laboratoire .....	56

<b>Figure 4.10</b> : Erreur relative de $I_{pv}$ pour chaque mesure de courant .....	<b>57</b>
<b>Figure 4.11</b> : Détermination des valeurs de $a_1$ et $a_3$ à partir des valeurs de $I_{pv,compteur}$ et $V_{pv,référence}$ mesurés précédemment à l'aide d'une calculatrice graphique ...	<b>59</b>
<b>Figure 4.12</b> : Algorithme utilisé pour trouver la valeur réelle du courant $I_{pv}$ à partir de la valeur mesurée par le capteur de courant (INA219) .....	<b>59</b>
<b>Figure 4.13</b> : Influence de la charge sur $V_{pv}$ .....	<b>61</b>
<b>Figure 4.14</b> : Influence de la charge sur $I_{pv}$ .....	<b>61</b>
<b>Figure 4.15</b> : Branchement du compteur à un ordinateur pour récupérer le journal de Eminute pendant une heure.....	<b>62</b>
<b>Figure 4.16</b> : Graphe de Eminute pendant une heure obtenu à partir d'un seul module PV	<b>62</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau 2.1</b> : Exemples de technologies de réseaux maillés sans fil .....	<b>26</b>
<b>Tableau 3.1</b> : Caractéristiques électriques de notre module photovoltaïque .....	<b>30</b>
<b>Tableau 3.2</b> : Spécifications techniques du contrôleur de charge "LS102460LPLI" .....	<b>32</b>
<b>Tableau 3.3</b> : Caractéristiques électriques de la batterie utilisée dans notre système .....	<b>33</b>
<b>Tableau 3.4</b> : Spécifications de la carte Raspberry Pi Pico .....	<b>35</b>
<b>Tableau 3.5</b> : Consommation d'énergie par le Raspberry Pi Pico sous différents modes .....	<b>36</b>
<b>Tableau 3.6</b> : spécifications électriques de l'INA219 .....	<b>37</b>
<b>Tableau 3.7</b> : Rôle des variables et de certaines instructions de l'algorithme d'affichage des paramètres instantanés.....	<b>43</b>
<b>Tableau 3.8</b> : Rôles des variables et de certaines instructions de l'algorithme de comptage d'énergie. ....	<b>44</b>
<b>Tableau 4.1</b> : Influence de l'inclinaison du module photovoltaïque sur $I_{cc}$ .....	<b>52</b>
<b>Tableau 4.2</b> : Influence de l'orientation du module photovoltaïque sur $I_{sc}$ .....	<b>52</b>
<b>Tableau 4.3</b> : Comparaison des mesures effectuées par le compteur et le multimètre .....	<b>57</b>
<b>Tableau 4.4</b> : Valeurs de $I_{pv,compteur}$ après l'application de l'algorithme de correction comparées aux valeurs de $I_{pv,référence}$ .....	<b>60</b>
<b>Tableau 4.5</b> : Valeurs de $V_{pv}$ de deux modules photovoltaïques branchés en parallèle avec différentes charges électriques .....	<b>60</b>
<b>Tableau 4.6</b> : Valeurs de $I_{pv}$ de deux modules photovoltaïques branchés en parallèle avec différentes charges électriques .....	<b>61</b>

# *Nomenclature*

## Nomenclature

ADC	Analog Digital Converter
AMR	Automatic Meter Reading
CPU	Central Processing Unit
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
GSM	Global System for Mobile Communications
I2C	Inter-Integrated Circuit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LCD	Liquid Crystal Display
LoRa	Low Range
MPP	Maximal Power Point
MPPT	Maximal Power Point Tracker
OLED	Organic Light-Emitting Diodes
PCB	Printed Circuit Board
PGA	Programmable Gain Amplifier
PIO	Programmable Input/output
PV	Photovoltaïque
PWM	Pulse Width Modulation
QSPI	Quad Serial Peripheral Interface
RF	Radio frequency
RTC	Real Time Clock
SCL	Serial Clock
SDA	Serial Data
SHS	Solar Home System
SRAM	Static Random Access Memory
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
VGA	Video Graphics Array
WAN	Wide Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

# *Introduction générale*

### **Introduction générale**

L'énergie se présente sous plusieurs formes : énergie thermique, énergie électrique, énergie mécanique, énergie chimique, énergie nucléaire, énergie solaire etc...

De nos jours, le besoin en énergie ne cesse de croître chaque année et les ressources fossiles utilisées telle que le gaz et le pétrole diminuent, ce qui pousse à la recherche des nouvelles sources d'énergie telle que l'énergie solaire qui peut être l'alternative la plus concurrente aux sources d'énergie actuelles grâce à la réduction considérable en coûts des générateurs photovoltaïques pendant la dernière décennie. [1]

Comme on utilise des générateurs photovoltaïques pour convertir l'énergie solaire en énergie électrique il est important de mesurer leur production pour surveiller leur performance aux différentes conditions. Pour cela un compteur d'énergie électrique est utilisé pour mesurer le courant et la tension des générateurs puis calculer la puissance et compter l'énergie produite.

Dans ce travail nous allons concevoir un compteur intelligent d'énergie électrique produite par les générateurs photovoltaïques qui sert à surveiller la production d'énergie en enregistrant des journaux sur plusieurs intervalles de temps.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres, le premier chapitre présente l'énergie solaire, la technologie photovoltaïque, et les systèmes de conversion photovoltaïques.

Le deuxième chapitre montre l'historique et l'évolution du compteur d'énergie électrique ainsi que le principe de fonctionnement du compteur intelligent et ses avantages.

Le troisième chapitre englobe les étapes de conception du compteur d'énergie électrique.

Le quatrième chapitre est dédié aux tests expérimentaux sur le système photovoltaïque ainsi que sur le compteur d'énergie pour valider son fonctionnement.

Enfin on résume nos travaux et résultats dans une conclusion générale.

# *Chapitre 1*

## *Généralités sur les systèmes de conversion photovoltaïque*

## **1.1 Introduction**

La production d'énergie électrique en Algérie est basée en grande partie sur des ressources fossiles comme le pétrole et le gaz, en fait ce sont des ressources polluantes et non renouvelables.

L'une des sources d'énergie les moins évaluées dans notre pays est l'énergie solaire tandis qu'elle est écologique et gratuite ce que la fait une bonne alternative pour les ressources fossiles.

Dans ce chapitre on va parler de la conversion de l'énergie solaire vers l'énergie électrique à travers la technologie photovoltaïque, donc on va expliquer le fonctionnement de la cellule photovoltaïque et ses caractéristiques et comment l'éclairement et la température les influencent.

Nous parlerons enfin sur les différents systèmes de conversion photovoltaïque et comment on les protège en cas d'ombrage ou de dysfonctionnement d'une cellule ou d'un ensemble de cellules, ainsi que la protection contre la foudre.

## **1.2 L'énergie solaire**

Le soleil est une étoile brillante qui a un rôle important dans la vie sur notre planète, non seulement pour les humains, mais aussi pour les autres créatures. Il détermine la météo, les saisons et le climat, et rend la vie végétale possible grâce à la photosynthèse. Sans la chaleur et la lumière du soleil, la vie sur Terre n'existerait pas. [2]

L'énergie solaire est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil qui est composé de photons. Pour convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique nous utilisons des panneaux photovoltaïques, qui sont fabriqués à base de matériaux semi-conducteurs utilisant leurs propriétés de photoélectricité pour générer la puissance électrique selon un principe appelé effet photoélectrique. [3]

On distingue deux grandes applications de l'énergie solaire dans la conversion d'énergie : [4]

- 1) La production photovoltaïque
- 2) Le solaire thermique

## **1.3 L'effet photovoltaïque**

L'effet photovoltaïque est mis en œuvre dans les cellules photovoltaïques, pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire grâce au déplacement des électrons et des trous dans les deux couches (N et P). [5]

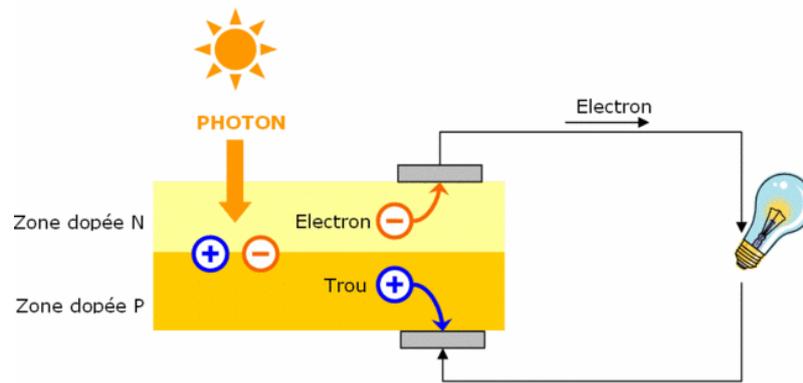


Figure 1.1 : L'effet photovoltaïque [6]

## 1.4 La Cellule Photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant optoélectronique que lorsqu'elle est exposée à la lumière, elle produit de l'électricité.

La cellule photovoltaïque est constituée de deux couches de matériau semi-conducteur, une couche dopée positivement (P) et l'autre dopée négativement (N), ces deux couches sont séparées par une zone on l'a dite Junction PN. [7]

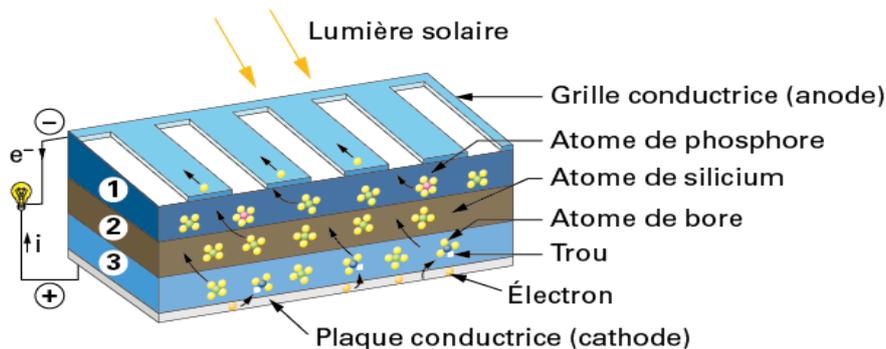


Figure 1.2 : La Cellule PV [8]

### 1.4.1 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Dans la couche N les atomes de phosphore et silicium se mélangent, l'atome de silicium possède 4 électrons dans son orbite externe et l'atome de phosphore possède 5 électrons dans son orbite externe, comme le phosphore possède un électron périphérique de plus que le silicium, la couche N est excédentaire en électrons.

Dans la couche (P) ce sont les atomes de Bore, le Bore possédant un électron de moins que le silicium donc la couche P est déficitaire en électrons, alors qu'est ce qui se passe bien il va avoir une circulation d'électrons qui sont en excès de la couche N vers la couche P, cette circulation va engendrer finalement un champ électrique, donc là on a la borne négative (-) et l'autre positive (+). [7]

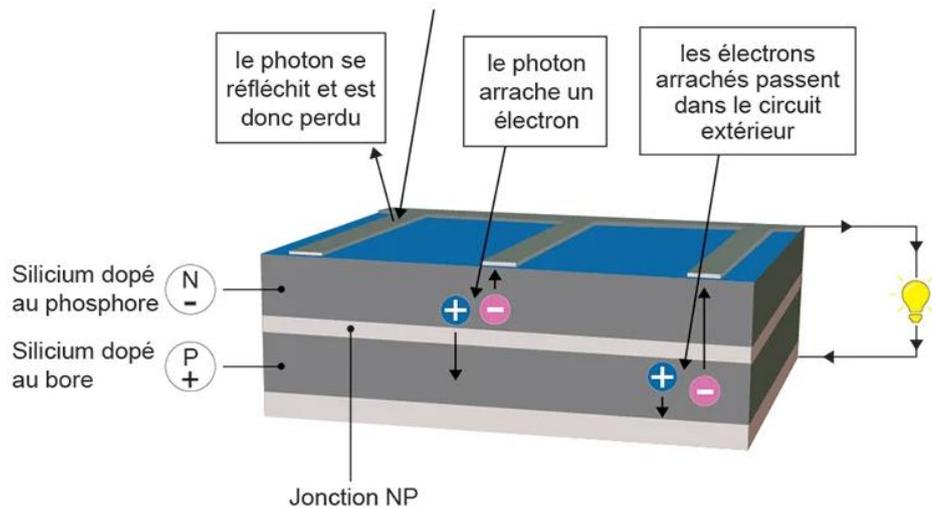


Figure 1.3 : Fonctionnement de la Cellule photovoltaïque [9]

### 1.4.2 Modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque

Le fonctionnement électrique d'une cellule photovoltaïque peut être représenté par le schéma électrique équivalent illustré dans la Figure 1.4. Il est symbolisé par :

- Un générateur de courant délivrant un photo-courant  $I_{ph}$  créé par le rayonnement solaire dans la cellule. Ce courant est proportionnel à la quantité de lumière captée par la cellule.
- Une diode, représentant la jonction P-N qui sépare la zone dopé P de la zone dopé N. Cette diode est parcourue par un courant  $I_d$ .
- Une résistance shunt  $R_{sh}$  qui représente les pertes dues au courant de fuite.
- Une résistance série  $R_s$  représentant les pertes intrinsèques dans la cellule.

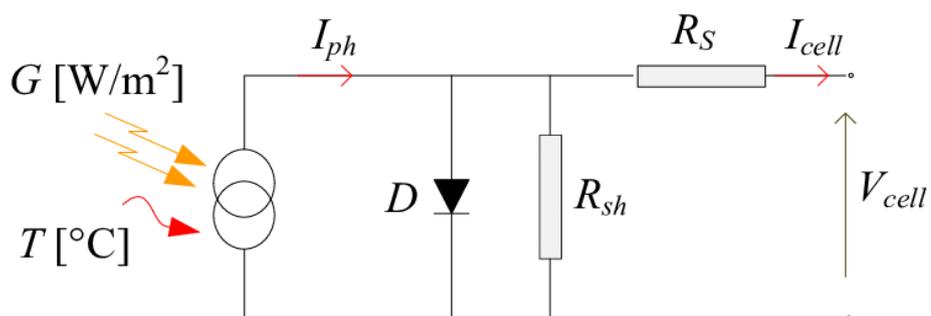


Figure 1.4 : Modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque [10]

Le courant de sortie de la cellule est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1.1)$$

Le courant qui traverse la diode est exprimé par :

$$I_d = I_s \cdot \left[ \exp\left(\frac{qV_d}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (1.2)$$

En remplaçant cette équation (1.2) dans l'équation de courant (1.1) nous obtenons :

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left[ \exp\left(\frac{qV_d}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (1.3)$$

Et comme  $V_d = V + R_s I$ , l'équation du courant de sortie devient :

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left[ \exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (1.4)$$

Avec :

G : L'éclairement ( $W/m^2$ )

T : La température en (Kelvin)

$I_{ph}$  : Source de Courant (Photo-Courant généré) (A)

D : Diode

$R_{sh}$  : La résistance shunt ( $\Omega$ )

$R_s$  : Résistance série ( $\Omega$ )

$I_{cell}$  : Courant de sortie de la cellule PV (A)

$V_{cell}$  : Tension de sortie de la cellule PV (V)

K : Constante de Boltzmann =  $1.38066 \times 10^{-23}$  (j/K) [11]

## 1.5 Caractéristique de la cellule Photovoltaïque

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations que peut prendre la cellule.

Trois grandeurs physiques définissent cette courbe :

- 1 La tension à vide : ( $V_{co}$ ) C'est la tension générée par une cellule éclairée non raccordée (aucun courant circule)
- 2 Le courant court-circuit : ( $I_{cc}$ ) C'est le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- 3 Le point de puissance maximal : (MPP) en anglais (maximal power point) correspond au résultat du produit entre la tension optimale et un courant optimal :  $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$  [12]

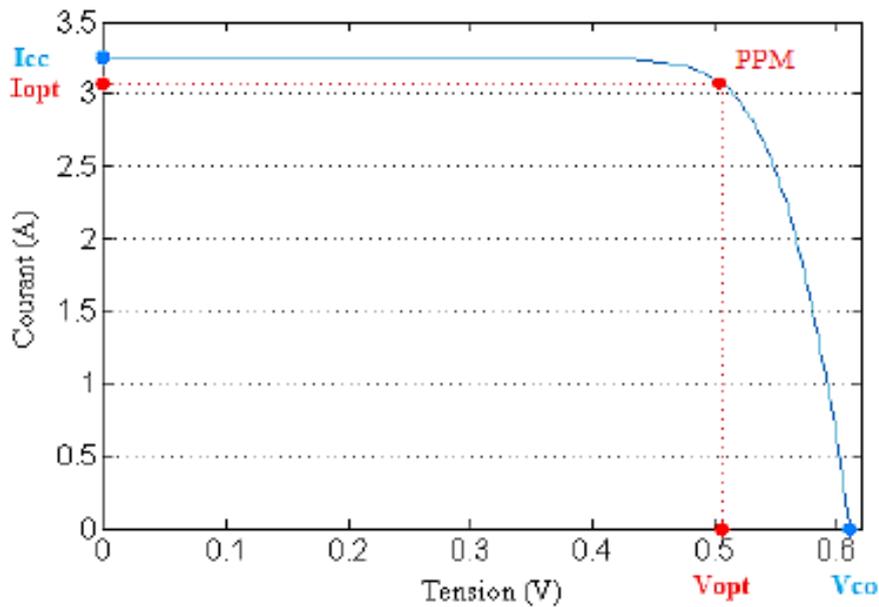


Figure 1.5 : Caractéristique I-V (courant-tension) de la cellule photovoltaïque [11]

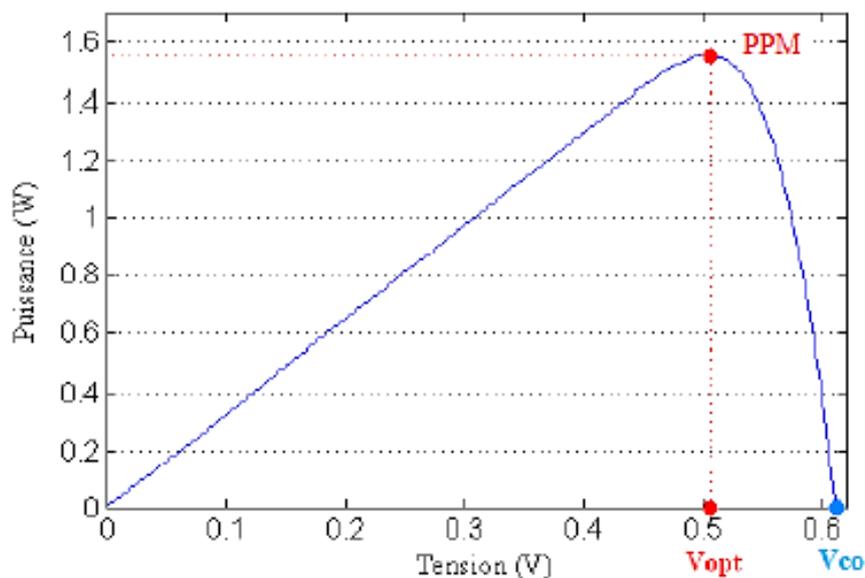
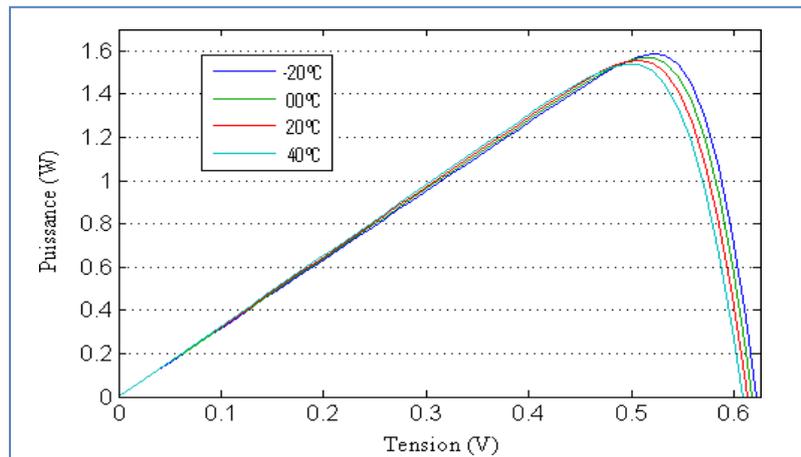


Figure 1.6 : Caractéristique P-V (puissance-tension) de la cellule photovoltaïque [11]

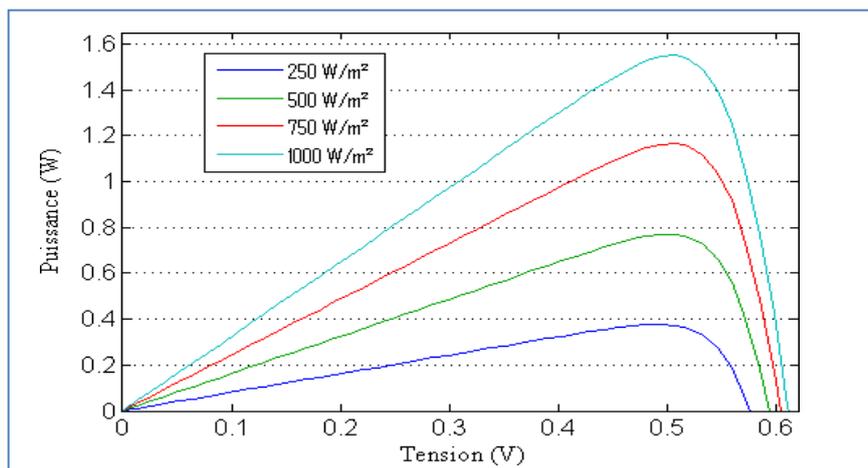
## 1.6 Effet de l'éclairement et de la température

Un des paramètres qui influent sur le profil de la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque est la température de la cellule, plus la température augmente plus la tension à vide de celle-ci diminue, ceci entraîne une diminution de la puissance maximale disponible. [13]



**Figure 1.7 :** Influence de la température sur la caractéristique P-V (puissance-tension) [11]

La luminosité influe considérablement sur les performances des cellules, plus l'éclairement augmente plus le courant de court-circuit augmente par contre la tension à vide varie légèrement [13]



**Figure 1.8 :** Influence de l'éclairement sur la caractéristique P-V (puissance-tension) [11]

## 1.7 Le Générateur Photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque est composé d'un ensemble de modules photovoltaïques. Un module est composé de plusieurs cellules photovoltaïques, généralement fabriquées à base de silicium, mais plusieurs autres matériaux sont aujourd'hui à l'étude, la puissance électrique continue créée dans une cellule s'additionne à la puissance générée par les autres cellules du module.

L'énergie produite est exploitée par des récepteurs DC ou AC à travers des convertisseurs et l'excès est stocké dans des accumulateurs (batteries).

Un générateur photovoltaïque transforme l'énergie issue des photons de la lumière en électricité grâce à l'effet photoélectrique. [14]



Figure 1.9 : Module Photovoltaïque [15]

## 1.8 Groupement des modules photovoltaïques

### 1.8.1 Groupement en série

Le groupement série permet d'augmenter la tension de sortie, pour un groupement de  $n$  modules montés en série, la tension de sortie  $U_s$  à pour expression générale  $U_s = n \cdot U_m$ . [16]

Avec :

$U_m$  : Tension fournie par un module

La figure ci-dessus montre le branchement en série de deux modules :

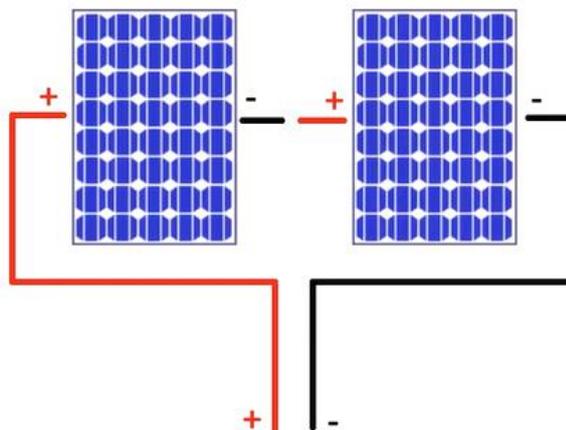


Figure 1.10 : Groupement des modules en série [17]

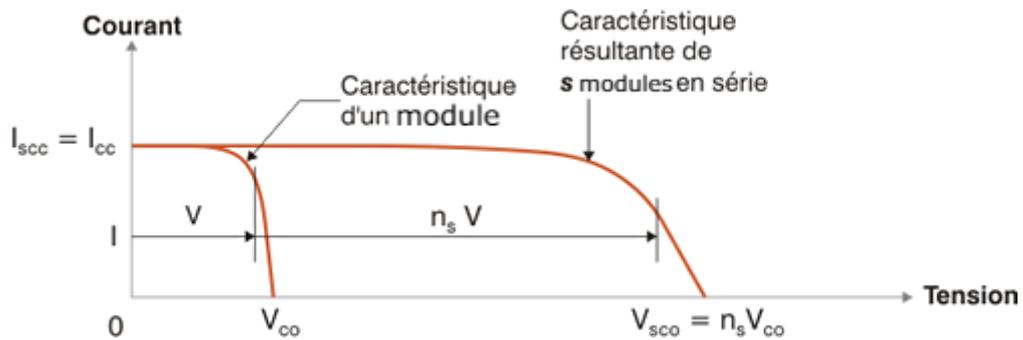


Figure 1.11 : Influence de l'association des modules en série sur la caractéristique I-V [12]

### 1.8.2 Groupement en parallèle

Le groupement en parallèle permet d'augmenter le courant de sortie, pour un groupement de n modules montés en parallèle.

La figure ci-dessus montre le groupement en parallèle de deux modules :

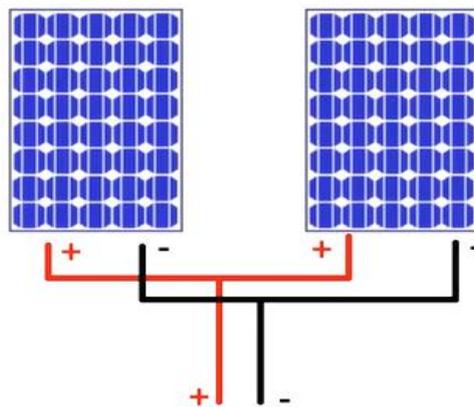


Figure 1.12 : Groupement parallèle des modules [17]

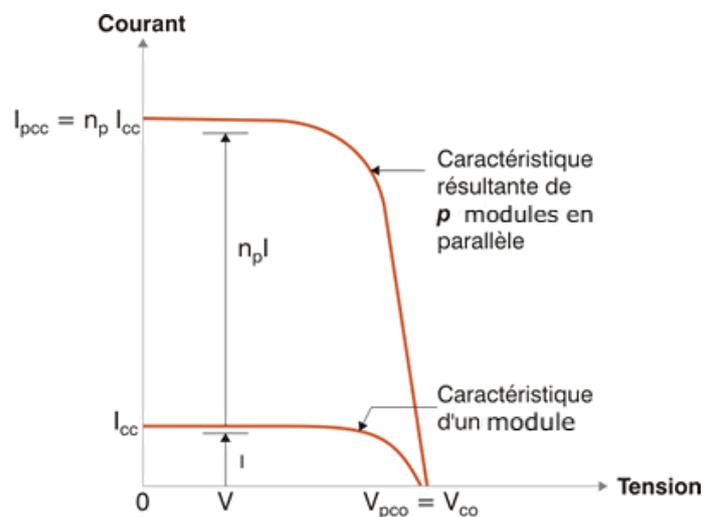


Figure 1.13 : Influence de l'association des modules en parallèle sur la caractéristique I-V [12]

1.8.3 Groupement mixte (Série Parallèle)

L'intérêt premier de montage série est en fait de pouvoir monter assez haut en tension. Lorsque tous les modules photovoltaïques sont branchés en parallèle, la tension résultante de cet ensemble de panneau égale à la tension d'un seul panneau, par contre le courant total à lui égal à la somme des courants fournis par chacun des panneaux.

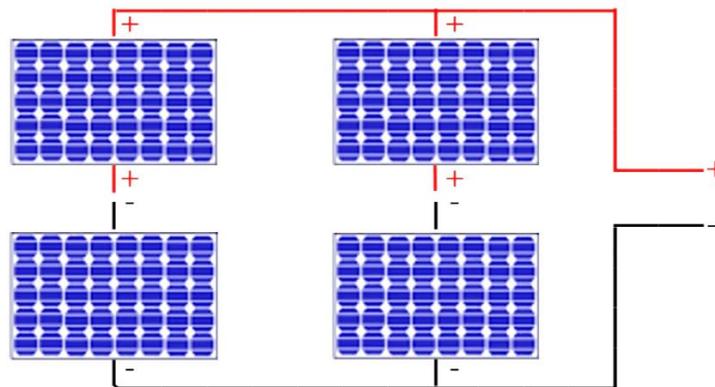


Figure 1.14 : Branchement Mixte [17]

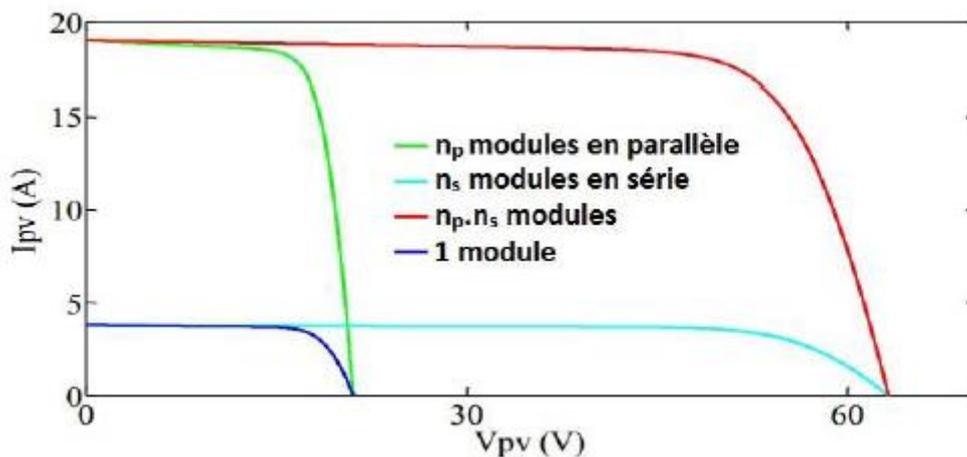


Figure 1.15 : Influence de l'association mixte des modules sur la caractéristique I-V [3]

1.9 Les systèmes de conversion photovoltaïque

1.9.1 Systèmes autonomes [18]

- Composition

Un système photovoltaïque autonome avec batterie d'accumulateurs comprend généralement différents composants de base.

### - Principe de fonctionnement

- Le générateur photovoltaïque : charge la batterie en période d'ensoleillement et alimente en direct, le cas échéant, les récepteurs.
- La batterie d'accumulateurs : assure le stockage de l'énergie électrique produite.
- Le contrôleur de charge : (type PWM ou MPPT) contrôle la charge de la batterie et limite sa décharge, ainsi il stabilise sa tension en une valeur désirée (12.7v par exemple).
- Le limiteur de décharge : protège la batterie contre les décharges profondes éventuelles.
- Les utilisations, constituées de récepteurs DC ou/et d'un onduleur, sont raccordées sur la batterie via le limiteur de décharge.

### - Application

On peut distinguer les systèmes photovoltaïques autonomes selon leurs puissances et leurs applications :

- Alimentation autonome de produit grand public : (lampes solaires, bornes de jardin,)
- Par énergie photovoltaïque de faible puissance : intégrée dans le produit
- Electrification de bâtiments : (quelques centaines de watts à quelques kW) : résidence secondaire, écoles et centres de santé dans les pays en développement, par kits photovoltaïque (SHS en anglais : Solar Home System).
- Alimentation pour des applications professionnelles : (quelques dizaines de watts à quelques kW) : signalisation protection cathodique, télécom.

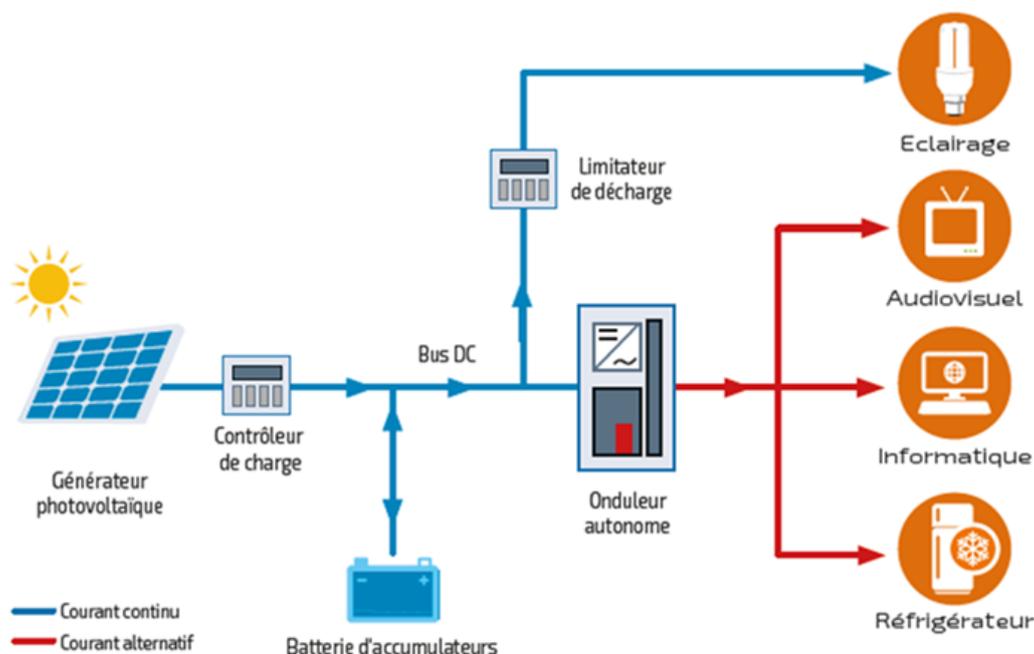


Figure 1.16 : Schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage [18]

### 1.9.2 Systèmes connectés au réseau [11]

Les systèmes connectés au réseau sont de plus en plus utilisés. La configuration de ce genre de système est plus compliquée que celle des systèmes autonomes ; la chaîne de conversion est composée essentiellement d'un convertisseur de type DC/DC suivi par un convertisseur DC/AC et un panneau de distribution qui gère le système. Une partie de l'énergie électrique produite par le générateur PV peut être injectée au réseau si la totalité de l'énergie produite dépasse le besoin des récepteurs, et réciproquement, si l'énergie électrique produite par le générateur PV n'est pas suffisante pour alimenter l'ensemble de récepteurs, une énergie complémentaire doit être fournie par le réseau électrique. [10]

Un ensemble de batteries peut être ajouté pour rendre le système plus efficace. Un schéma synoptique d'un système de conversion photovoltaïque connecté au réseau de distribution est illustré dans la Figure 1.17.

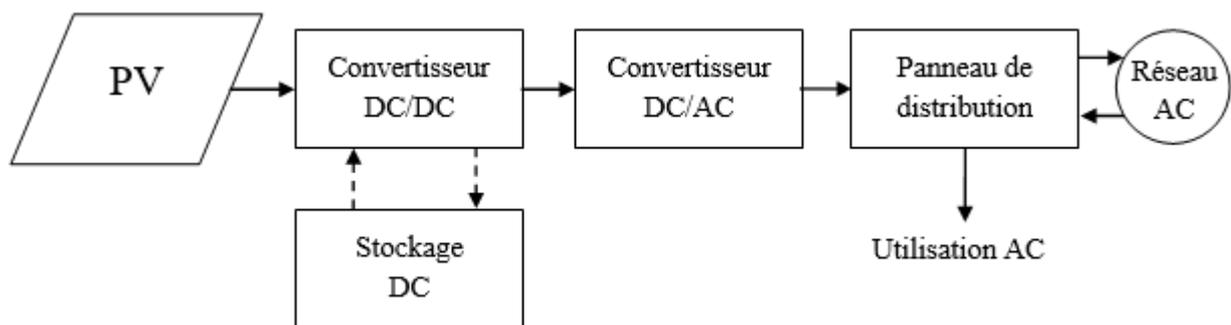


Figure 1.17 : Schéma synoptique d'un système PV connecté au réseau [11]

### 1.9.3 Systèmes hybrides [11]

Les systèmes hybrides qui utilisent l'énergie renouvelable sont des systèmes de conversion où le générateur principal (ici le générateur photovoltaïque) fonctionne avec un ou plusieurs autres générateurs en alternance ou en même temps. Les générateurs secondaires peuvent être une éolienne, un générateur Bio-mass ou n'importe quel générateur d'électricité.

Dans le cas où le système hybride utilise une source d'énergie produisant un courant alternatif, un convertisseur AC/DC (redresseur) est généralement utilisé pour convertir l'énergie en DC. Par ailleurs, dans le cas où le système utilise une source d'énergie produisant un courant continu, un convertisseur DC/DC est aussi nécessaire pour avoir des paramètres de sortie compatibles avec les paramètres imposés par le Bus DC où tous les sous-systèmes se raccordent. Ces systèmes sont parfois équipés d'un bloc de stockage d'énergie qui peut être un ensemble de batteries, de supercondensateurs ou d'un réservoir

d'Hydrogène. La Figure 1.18 représente un schéma bloc d'un système hybride.

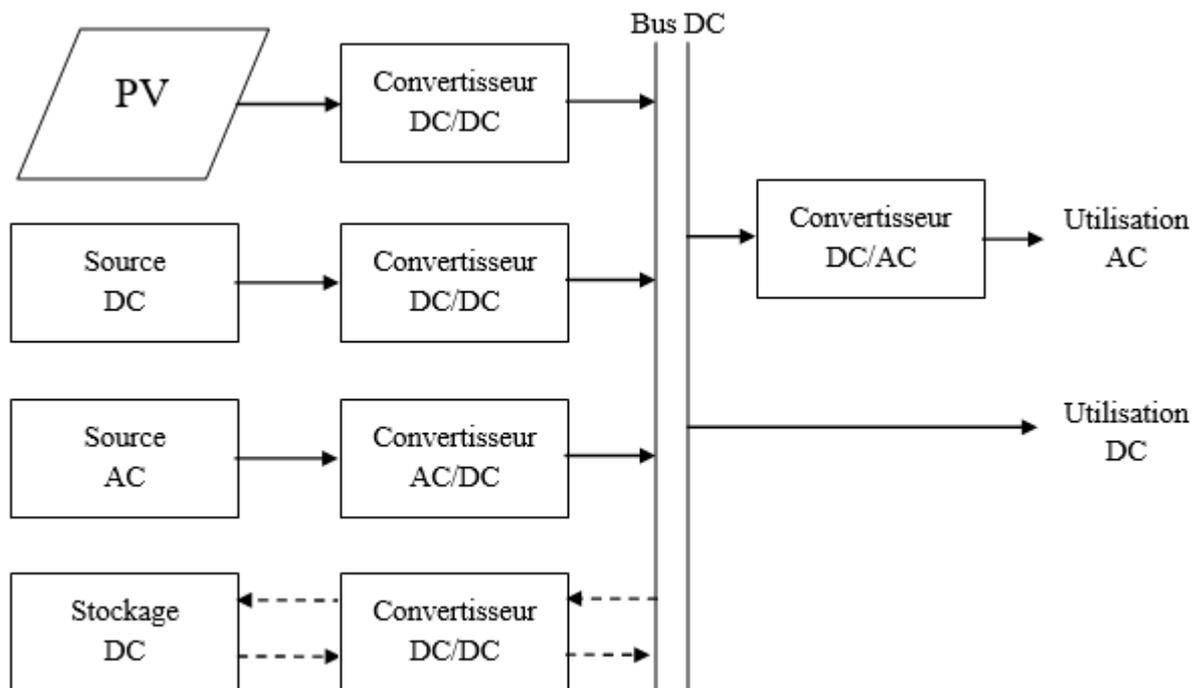


Figure 1.18 : Schéma synoptique d'un système hybride (PV et autres sources) [11]

### 1.10 Protection des modules photovoltaïques

Généralement les modules photovoltaïques sont protégés d'une manière à éviter certains problèmes qui peuvent détruire les cellules et à assurer la production d'électricité si le niveau d'éclairement n'est pas homogène pour l'ensemble de modules, et même si une cellule ou un ensemble de cellules est ombré ou endommagé. Les protections les plus utilisés sont à base de diodes comme il est représenté sur la Figure 1.19.

- Des diodes by-pass sont utilisées pour chaque ensemble de cellules afin d'isoler le reste du module photovoltaïque en cas où un de ces ensembles de cellules ne produit pas un courant électrique suffisant. La caractéristique représentée dans la Figure 1.20 (en couleur bleu) concerne un module PV protégé par des diodes by-pass dont un groupe de ces cellules n'est pas bien éclairé par rapport aux autres cellules. Cette caractéristique a deux points de puissance maximale PPM1 et PPM2, où la tension électrique correspondante au premier point est proche de  $V_{co}$ , et le courant électrique correspondant au deuxième point est proche de  $I_{cc}$ .
- Une diode anti-retour utilisée comme protection contre le courant inverse qui peut endommager les cellules PV. Ce courant inverse peut exister par exemple lorsque le module

photovoltaïque est connecté directement à une batterie durant la nuit, ou lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle et aucun récepteur n'est alimenté. [11]

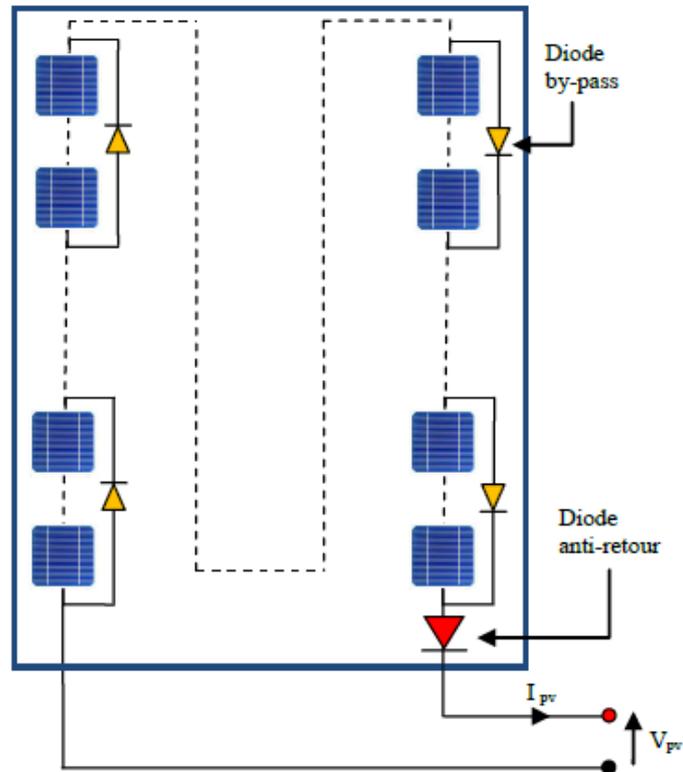


Figure 1.19 : Protection des modules photovoltaïques [11]

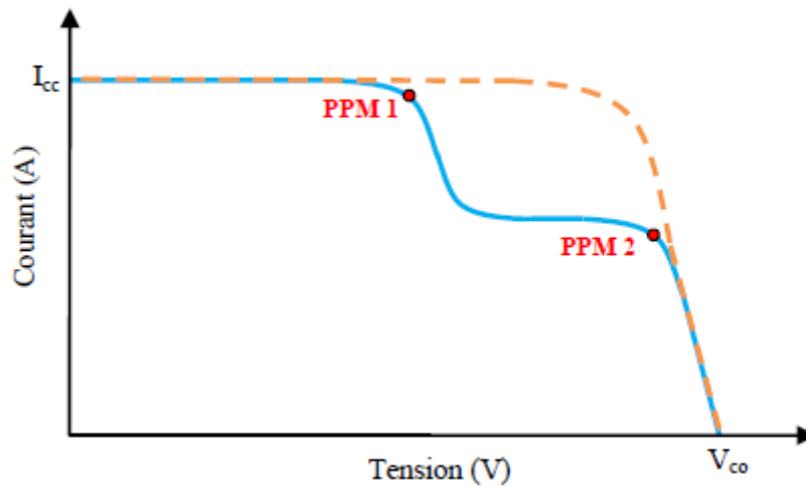
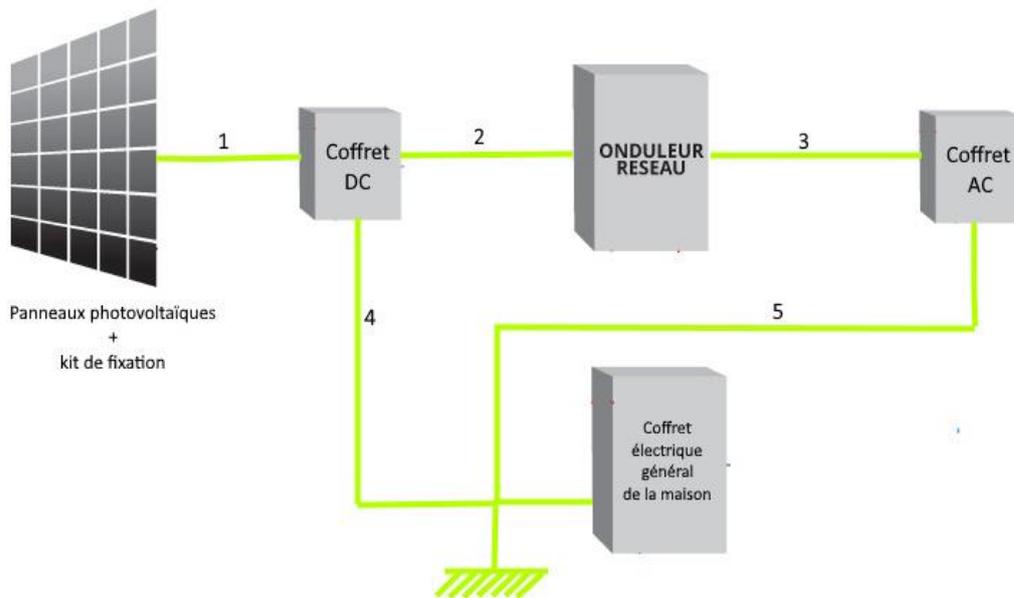


Figure 1.20 : Effet de la diode by-pass sur la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque [11]

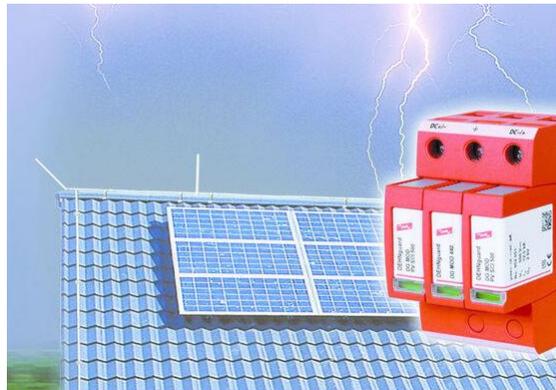
### 1.10.1 Protection des systèmes photovoltaïques contre la foudre [21]

D'abord on relie le circuit électrique de l'habitation à la terre comme il est montré dans la figure suivante :



**Figure 1.21 :** Schéma de la mise à la terre d'une installation avec coffret DC et AC distincts [19]

Ensuite on installe un parafoudre dans le tableau électrique comme celui dans la figure suivante :



**Figure 1.22 :** Parafoudre triphasé [20]

Le parafoudre est un appareil destiné à protéger le matériel électrique contre les surtensions qui peuvent être causées par la foudre. Il fonctionne à l'aide de varistances qui sont capables de bloquer certaines tensions. Lorsque celle-ci est trop élevée, l'impédance de la résistance chute et le courant est transmis pour s'évacuer dans la terre. [21]

Enfin on installe un paratonnerre sur la terrasse de la maison comme il est montré sur la figure suivante :

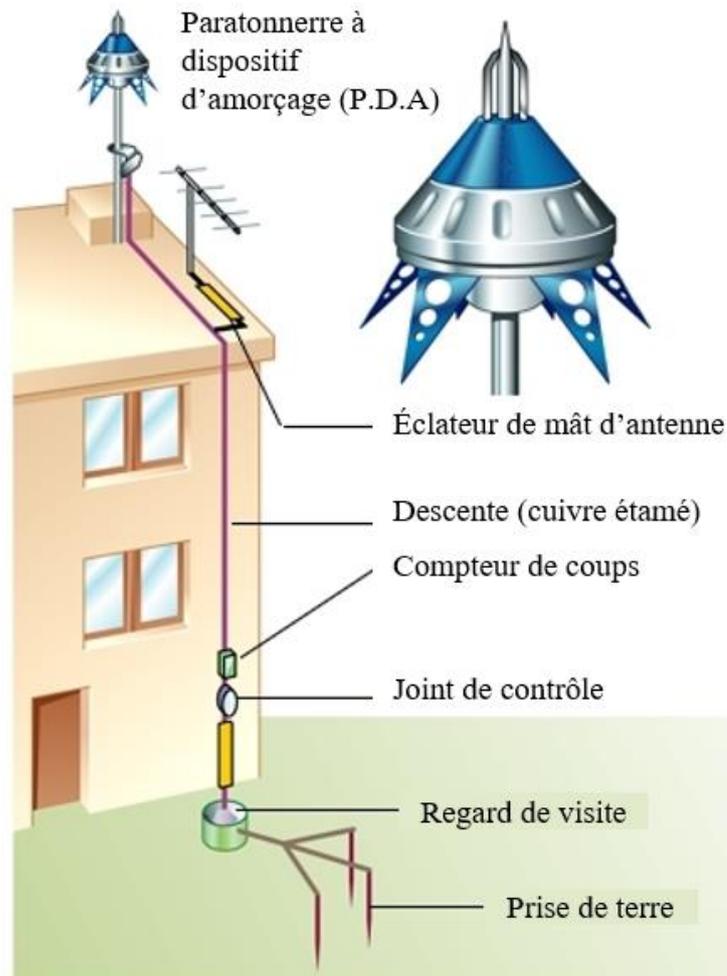


Figure 1.23 : Installation d'un paratonnerre sur la terrasse d'une maison [22]

### 1.11 Conclusion

L'énergie solaire peut être au futur proche la remplaçante des sources d'énergie non renouvelables telles que le pétrole et le gaz par exemple, parce qu'elle est une source d'énergie propre et gratuite.

L'énergie solaire est utilisée comme un moyen de production de l'électricité pour les zones rurales, elle est utilisée aussi dans les systèmes d'éclairage public solaires.

Dans ce chapitre nous avons parlé de l'énergie solaire et comment on peut la convertir en énergie électrique grâce aux générateurs photovoltaïques, l'influence des paramètres atmosphériques ainsi que les modes de branchement des modules, et nous avons présenté les différents types de protection à la fin du chapitre.

## *Chapitre 2*

### *Les compteurs d'énergie électrique*

## 2.1 Introduction

Un compteur d'énergie électrique est un organe électrique servant à mesurer la quantité d'énergie électrique consommée par une charge électrique : habitation, industrie... Il est utilisé par les fournisseurs d'électricité afin de facturer la consommation d'énergie au client. Ou par les individus pour mesurer la consommation d'une ou plusieurs charges électriques. Ou encore plus pour mesurer l'énergie produite par les sources d'énergie renouvelable.

Dans un monde connecté il est devenu évident que les compteurs d'énergie peuvent bénéficier des technologies de télécommunications ce qui a conduit au développement des compteurs intelligents.

Dans ce chapitre nous allons explorer l'historique des compteurs d'énergie électrique et le principe de fonctionnement d'un compteur intelligent et ses avantages.

## 2.2 Historique et évolution du compteur d'énergie électrique

La figure suivante montre les points les plus importantes dans l'évolution du compteur d'énergie électrique :

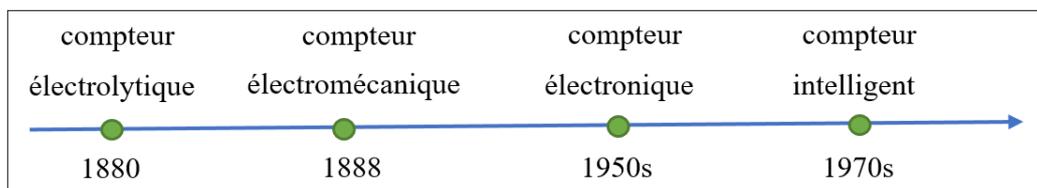


Figure 2.1 : Evolution du compteur d'énergie électrique [23-24-25]

### 2.2.1 Le compteur électrolytique

Avant l'année 1880 les abonnés à l'électricité avaient leur facture au forfait par redevance mensuelle en fonction des lampes installées. Évidemment cette formule ne répondait pas à la vérité de consommation. [25]

C'était en 1880 que Thomas Edison créa un système plus efficace : le compteur électrolytique. Ce compteur électrolytique comprenait deux électrodes de cuivre. La première était sous une solution acide qui créait une matière lorsqu'elle était traversée par l'électricité. Cette matière se déposait sur la deuxième électrode.

Quand l'abonné consomme plus d'électricité la masse de matière déposée sur la deuxième électrode était importante. Le poids de la matière accumulée donne la quantité d'énergie consommée. La lampe et le fil de résistance au bas du compteur empêchaient les solutions de geler en hiver. [23]



Figure 2.2 : Compteur électrolytique de Thomas Edison [23]

### 2.2.2 Le compteur électromécanique

En 1888 Oliver B. Shallenberger, chef électricien chez Westinghouse développe un compteur de courant alternatif proche du compteur électromécanique moderne et établit la nouvelle norme.

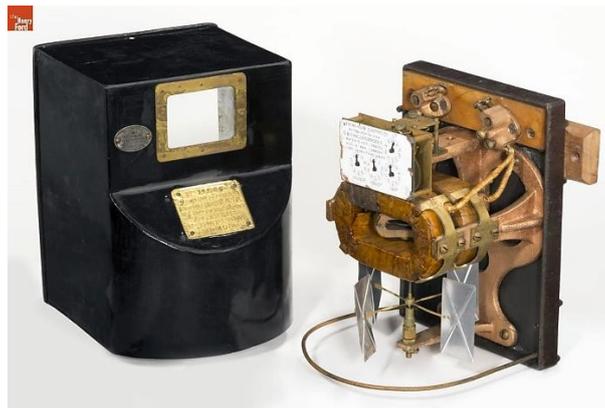


Figure 2.3 : Le compteur électromécanique de Schallentberger [24]

Ce type de compteurs fonctionne par induction électromagnétique en comptant les révolutions d'un disque métallique non magnétique, mais électriquement conducteur, qui est amené à tourner à une vitesse proportionnelle à la puissance traversant le compteur. Le nombre de tours est donc proportionnel à la consommation d'énergie.

Le disque est actionné par deux ensembles de bobines d'induction, qui forment, en fait, un moteur à induction linéaire biphasé. Une bobine est connectée de manière à produire un flux magnétique proportionnel à la tension et l'autre produit un flux magnétique proportionnel au courant.

Le disque entraîne un mécanisme d'enregistrement qui compte les révolutions, un peu comme le compteur kilométrique d'une voiture, afin de rendre une mesure de l'énergie totale utilisée. [26]

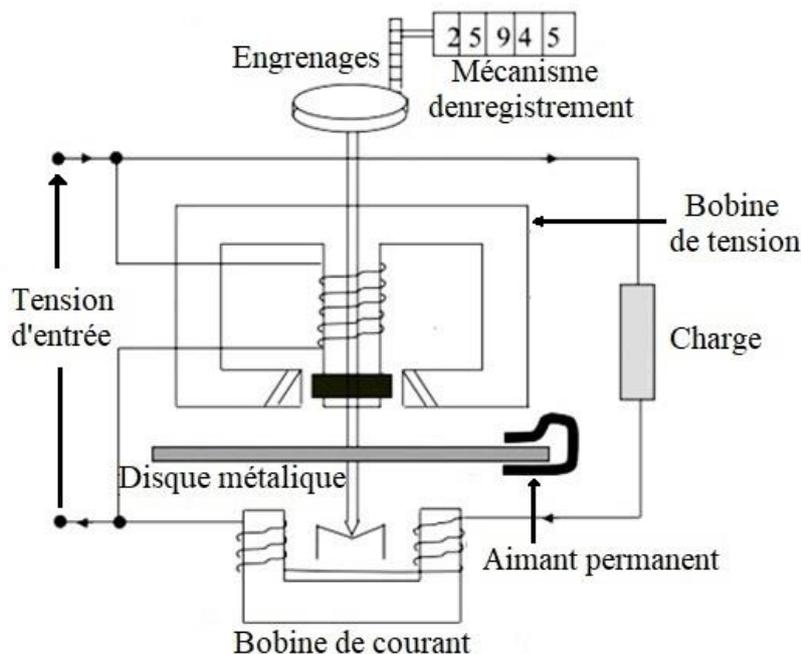


Figure 2.4 : Schéma interne d'un compteur électromécanique [27]

### 2.2.3 Le compteur électronique

L'avènement de la technologie à semi-conducteurs, des circuits intégrés et des microprocesseurs au milieu du XXe siècle a conduit au développement des compteurs électroniques en utilisant le traitement numérique du signal. Ces compteurs à l'origine remplissent les mêmes fonctions que le compteur électromécanique analogique, mesurant et fournissant une lecture directe de la consommation totale d'électricité. Les compteurs électroniques ont d'abord été utilisés pour les clients commerciaux et industriels qui avait des structures tarifaires plus complexes que les clients résidentiels. Comme les coûts des compteurs électroniques ont diminué leur utilisation s'étend à toutes les catégories des clients. [25]

Ce type de compteur est basé sur un microcontrôleur qui utilise des capteurs électroniques de courant et de tension pour calculer l'énergie consommée et l'afficher sur une interface (un afficheur LCD généralement).



Figure 2.5 : Compteur électronique moderne

### 2.2.4 Le compteur intelligent

La première génération des compteurs électroniques nécessitait encore une lecture manuelle via un affichage numérique. L'invention de la lecture automatique des compteurs (Automatic Meter Reading (AMR)) par Theodoros Paraskevakos dans les années 1970s, cependant, changé cela. Les compteurs AMR associent un compteur électronique à un module de communication. Cela permet la communication unidirectionnelle des données de consommation via les lignes téléphoniques fixes vers un emplacement central. [25-28]

Les compteurs électroniques ont progressivement évolué dans les années 1980s et 1990s, passant de l'AMR à ce que l'on appelle désormais les compteurs intelligents. Comme la technologie des microprocesseurs s'est améliorée, les compteurs électroniques sont devenus capables de mesurer et d'enregistrer des données sur la consommation d'électricité à des intervalles de temps séparés (généralement à des intervalles de 60, 30 ou 15 minutes). [25]

Un exemple des compteurs intelligents modernes est le compteur appelé Linky qu'était déployé par l'entreprise Enedis en France à partir de 2016.



Figure 2.6 : Le compteur intelligent Linky déployé par l'entreprise Enedis en France. [29]

### 2.3 Principe de fonctionnement du compteur intelligent

Le compteur intelligent est un compteur électronique avec une unité de communication, la figure suivante montre sa structure matérielle :

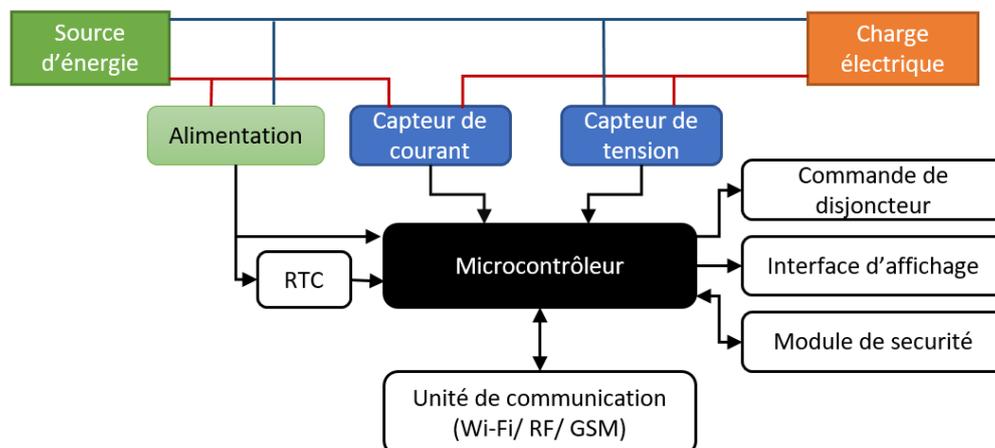


Figure 2.7 : Structure matérielle d'un compteur intelligent [30]

Comme montré dans la figure précédente un compteur intelligent est généralement constitué des éléments suivants :

**2.3.1 Alimentation :** Qui sert à fournir une tension approprié et stable pour tous les composants du compteur. Il s'agit généralement d'un abaisseur de tension DC-DC si le courant de la source d'énergie est continu ou AC-DC s'il est alternative.

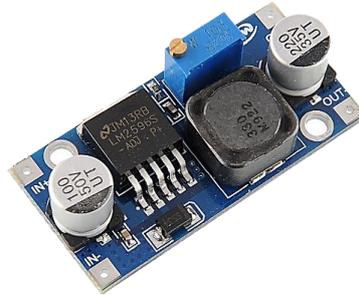


Figure 2.8 : Exemple d'un abaisseur de tension DC-DC

### 2.3.2 Capteur de tension

Le plus simple capteur de tension est le pont diviseur de tension qui utilise une série de deux résistances pour produire la tension de sortie  $V_{out}$  qui est une fraction de la tension d'entrée  $V_{in}$  en raison de la distribution de la tension entre les deux résistances. La valeur des deux résistances est bien choisie de telle sorte que la tension de sortie est dans la plage acceptable par le microcontrôleur afin d'être convertie en valeur numérique.

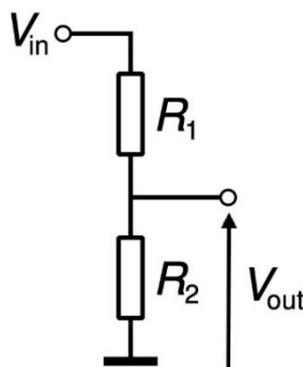


Figure 2.9 : Circuit pont diviseur de tension

$V_{out}$  est exprimé en fonction de  $V_{in}$ ,  $R_1$  et  $R_2$  avec l'équation suivante :

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad (2.1)$$

Avec :

$V_{out}$  : Tension à mesurer par le microcontrôleur.

$V_{in}$  : Tension d'entrée provenant de la source.

### 2.3.3 Capteur de courant

Sert à détecter le courant qui passe dans la charge en temps réel, puis l'envoyé vers un microcontrôleur afin de calculer la puissance. Il existe plusieurs types de capteur de courant, on mentionne les trois suivants :

#### 2.3.3.1 Capteur à résistance de shunt

Les shunts sont les seuls capteurs opérant une mesure directe de courant. Un shunt est une résistance  $R_s$  calibrée et connue, placée en série avec le conducteur traversé par le courant à mesurer  $I_{mes}$ . La mesure de la tension  $V_{out}$  à ses bornes permet de déterminer le courant en utilisant la loi d'Ohm. [31]

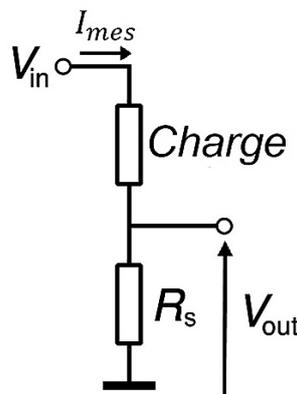


Figure 2.10 : Circuit d'un capteur à résistance de shunt

Pour calculer  $I_{mes}$  on utilise l'équation suivante :

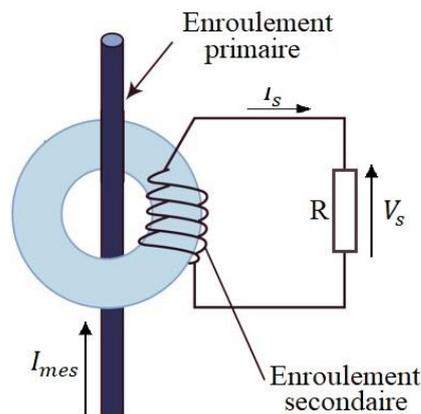
$$I_{mes} = \frac{V_{out}}{R_s} \quad (2.2)$$

L'avantage de cette technique est sa simplicité est sa précision, et peut également être utilisé pour mesurer les deux types de courant, continu et alternatif. L'inconvénient de cette technique est : [32]

- Une dissipation de puissance dans la résistance shunt (la puissance dissipée est proportionnelle au carré du courant circulant à travers la résistance de shunt).
- Un problème de chute de tension en particulier lors de la mesure des courants élevés.

#### 2.3.3.2 Capteur à Transformateur de courant

Comme tout autre type de transformateurs, un transformateur de courant produit un courant secondaire qui est directement proportionnel à son courant primaire et sont pratiquement en phase. C'est en fait un transformateur abaisseur de courant. [33]



**Figure 2.11** : Schéma de principe d'un transformateur de courant. [31]

Son principe repose sur le théorème d'Ampère et la loi de Lenz : le premier veut que le courant parcourant le conducteur primaire crée une induction qui, pour peu que son flux varie, engendre, en vertu de la seconde, une force électromotrice (f.e.m.) variable aux bornes du secondaire. Il en résulte aux bornes de la charge  $R$  une tension  $V_s$  proportionnelle à  $I_{mes}$ , telle que la sensibilité du transformateur vérifie la relation [31] :

$$\frac{V_s}{I_{mes}} = R \frac{N_1}{N_2} \quad (2.3)$$

Avec :

$N_1$  : Nombre de spires du primaire

$N_2$  : Nombre de spires du secondaire

### 2.3.3.3 Capteur à effet Hall

Dans ces capteurs, la production de la tension où la différence de potentiel est due à l'écoulement du courant perpendiculairement au champ magnétique. La tension produite est perpendiculaire à la direction de circulation du courant. Ce principe a été nommé d'après Edwin Hall en 1879. Par conséquent, le capteur à effet Hall est un capteur qui produit une tension comme sortie, qui varie en fonction de la variation de champ magnétique produit par le courant d'entrée. En général, ce capteur se compose principalement de deux types :

- **Capteurs à effet Hall en boucle ouverte** : Le conducteur traversé par le courant d'entrée dont on veut le mesurer est placé dans l'entrefer du circuit primaire. Cet écoulement de courant produit une tension de Hall  $V_H$  qui est proportionnel au courant d'entrée  $I_{mes}$ . Fréquemment, on ajoute un circuit à la sortie de ce capteur pour améliorer le signal utilisé et obtenir une tension désirée  $V_s$ .

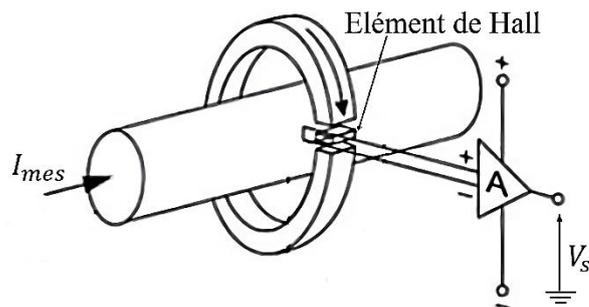


Figure 2.12 : Capteur de courant à effet Hall en boucle ouverte

- Capteurs à effet Hall en boucle fermée** : Ce capteur est constitué du même circuit que celui en boucle ouverte, sauf qu'il y a un circuit supplémentaire (bobine secondaire) qui produit un courant en opposition (à l'équilibre) du courant primaire  $I_{mes}$ . Ce qui produit un courant de compensation qui est proportionnel au courant primaire. Le courant secondaire  $I_s$  produit est l'image du courant primaire et est convertie en tension  $V_s$  par une résistance  $R_s$ .

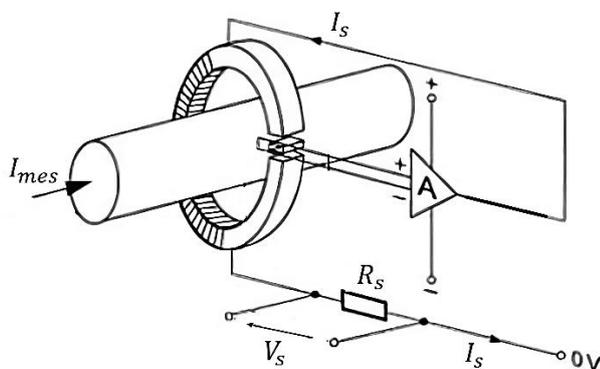


Figure 2.13 : Capteur de courant à effet Hall en boucle fermée [34]

### 2.3.4 Microcontrôleur

Qui est le cœur du compteur intelligent, car il permet de faire tous les calculs et le traitement des données. Ce dernier est un circuit intégré qui contient plusieurs périphériques comme l'ADC, l'UART, les Entrées/Sorties numériques...

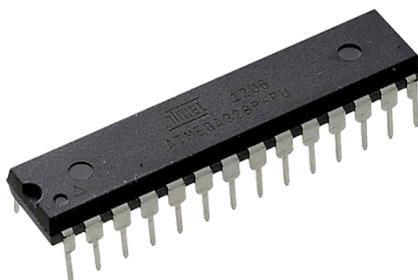


Figure 2.14 : Exemple d'un microcontrôleur

### 2.3.5 Unité de communication

Le compteur électrique intelligent pourra transmettre les informations nécessaires concernant la consommation de l'énergie électrique, les informations anti piratage, etc. mais pourra également recevoir des informations telle que la tarification en temps réel. Ces informations transmises devront être codées avant leur transmission de la source à la destination et vice versa. [35]

Les technologies de communication les plus utilisées sont :

#### 2.3.5.1 GSM

Le système mondial de communications mobiles (Global System for Mobile Communications (GSM)) est une norme développée par l'institut européen des normes de télécommunications ETSI (European Telecommunications Standards Institute) pour décrire les protocoles des réseaux cellulaires numériques de deuxième génération (2G) utilisés par les appareils mobiles tels que les téléphones portables. [36]

Le GSM est une technologie pratique de communication pour les compteurs intelligents car il est bien établi et largement répandu. L'inconvénient principal est qu'il nécessite un abonnement et donc plus de frais pour l'utiliser.



Figure 2.15 : Exemple d'un module GSM

#### 2.3.5.2 WIFI

C'est une famille de protocoles de réseau sans fil, basée sur la famille de normes IEEE 802.11, qui sont couramment utilisées pour la mise en réseau locale d'appareils et l'accès à Internet, permettant aux appareils numériques à proximité d'échanger des données par ondes radio. [37]

L'utilisation du Wifi n'est pas pratique au niveau commercial car sa portée est limitée au dizaines de mètre. Mais il convient à l'usage individuel pour surveiller la consommation d'une machine ou la production des panneaux solaire par exemple, en utilisant le smartphone ou l'ordinateur. Le compteur intelligent peut aussi utiliser le Wifi pour accéder à internet et faire les données de consommation ou de production d'énergie accessible en ligne.



Figure 2.16 : Exemple d'un module Wifi

### 2.3.5.3 Le réseau maillé sans fil

Le réseau maillé sans fil ou encore « RF mesh network » en anglais est un système où chaque compteur est un nœud, et chaque nœud est connecté sans fil à beaucoup d'autres, configuré pour permettre aux connexions d'être redirigées autour des chemins bloqués, le signal passe de nœud en nœud jusqu'à ce qu'il atteigne sa destination. Aussi, ce réseau n'a pas besoin de routeurs désignés ; à la place, les nœuds servent comme routeurs l'un pour l'autre. [38]

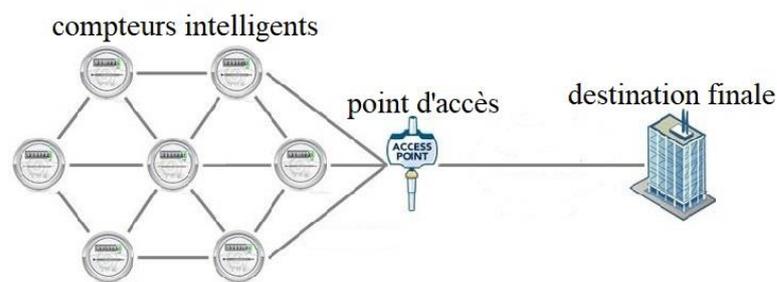


Figure 2.17 : Schéma simplifié d'un réseau maillé sans fil des compteurs intelligents [39]

Cette technologie est largement utilisée en Amérique du nord et dans d'autres régions du monde dans les applications de télémétrie intelligente. [40]

Selon la fréquence et le type de réseau, il existe un certain nombre de technologies de réseau maillé sans fil. Quelques exemples sont présentés dans le tableau suivant :

Nom de technologie	Fréquence d'opération
Zigbee	2.4GHz, 900MHz
LoRaWAN	902.3MHz-914.3MHz
LoWPAN	< 1 GHz
Wave	908.42MHz

Tableau 2.1 : Exemples de technologies de réseaux maillés sans fil. [41]

### 2.3.6 Interface d'affichage

Qui est généralement un afficheur LCD, ce qui permet d'afficher les informations de consommation calculées par le compteur. Ses fonctionnalités peuvent être :

- L'affichage de la tension et du courant
- L'affichage de la consommation instantanée en Watt ou en kilowatt
- L'affichage de la consommation énergétique en Wattheure
- L'affichage du coût
- L'alerte visuelle en cas de dépassement d'un seuil de consommation paramétrable
- La visualisation des historiques sur l'afficheur au choix : par jour / semaine / mois

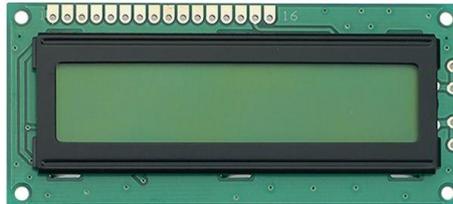


Figure 2.18 : Exemple d'un afficheur LCD

### 2.3.7 Commande de disjoncteur

Qui est nécessaire afin d'assurer la protection des équipements électriques en cas de détection d'un défaut.

### 2.3.8 Module de sécurité

Un module qui met en place des mesures permettant de garantir la sécurité et la confidentialité des données traitées par les appareils qu'il fournit à la personne, et doit prendre toutes précautions utiles pour en empêcher la prise de contrôle par une personne non autorisée. [42]

### 2.3.9 RTC

Une horloge temps réel RTC (real time clock) est fondamentalement identique à une montre. Les bénéfices d'une RTC incluent :

- Reste à l'heure même en cas de coupure de tension car elle fonctionne sur une pile.
- Permet de préserver l'heure sur longues périodes, même si on reprogramme le microcontrôleur.
- Plus précis que d'autres méthodes, comme la programmation de timer du contrôleur.
- Elle libère le système principal pour exécuter les tâches sensibles au temps.
- Faible consommation d'énergie.

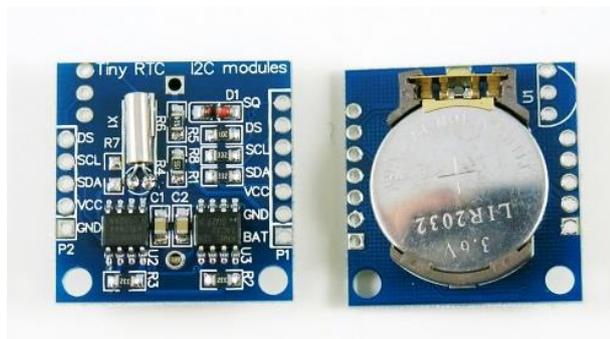


Figure 2.19 : Exemple d'une RTC (Vue dessus et dessous)

## 2.4 Avantages du compteur intelligent

Grâce à son capacité de communiquer, le compteur intelligent offre plusieurs avantages pour les entreprises d'énergie et leurs clients et aussi pour les individus :

- Réduire le coût de la lecture de compteur par l'élimination des postes de lecture d'énergie et automatiser le processus de facturation et donc éliminer toutes les dépenses associées.
- Les compteurs intelligents peuvent détecter la falsification des compteurs et le vol d'électricité et communiquer l'information immédiatement.
- Détecter les surtensions sur le réseau électrique et couper à distance l'alimentation pour protéger les appareils électriques fonctionnant dans le logement.
- Les consommateurs d'électricité bénéficient d'accès à des données de consommation plus détaillées qui peuvent être utilisées au gestion de l'énergie pour réduire les factures d'électricité.
- Pour les consommateurs résidentiels, les compteurs intelligents peuvent être connectés à des réseaux domestiques (smart home) qui communiquent des informations aux appareils électroménagers. Les consommateurs peuvent programmer leurs préférences afin que les appareils comme les laveuses et les sèche-linge ne fonctionnent que pendant certaines périodes ou en fonction des prix. De telles activités peuvent réduire les factures des consommateurs et minimiser la surcharge du réseau électrique.
- La réduction de la consommation d'énergie entraîne des réductions des émissions nocives à l'environnement.
- Pour les systèmes photovoltaïques autonomes :
  - Accès à distance aux données de génération d'énergie.
  - Offre des données détaillées de génération d'énergie qui peuvent être utilisées pour le redimensionnement du système (changement de la capacité des batteries ou du nombre de panneaux solaires par exemple).
  - Possibilité d'être notifié immédiatement en cas de panne.

## **2.5 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons exploré l'historique et l'évolution chronologique du compteur d'énergie électrique à travers les différentes technologies utilisées : électrolytique, électromécanique, électronique et enfin le compteur intelligent qui est un compteur électronique communiquant.

Nous avons aussi expliqué le principe de fonctionnement du compteur intelligent et montré avec détails la structure matérielle et le rôle des composants principaux.

Enfin nous avons mentionné les avantages des compteurs intelligents en général et ceux utilisés pour les systèmes photovoltaïques autonomes.

## *Chapitre 3*

*Etapes de conception d'un compteur  
d'énergie électrique produite par les  
générateurs photovoltaïques*

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter le système photovoltaïque autonome proposé et l'architecture Hardware de notre compteur ainsi que l'outil de programmation. On va aussi démontrer l'algorithme utilisé et la réalisation du compteur.

Ce compteur va être intégré dans un système photovoltaïque autonome pour mesurer l'énergie produite par le générateur photovoltaïque, donc on doit considérer ça durant la conception.

### 3.2 Système photovoltaïque autonome proposé

On propose la configuration de la figure suivante pour le système photovoltaïque autonome :

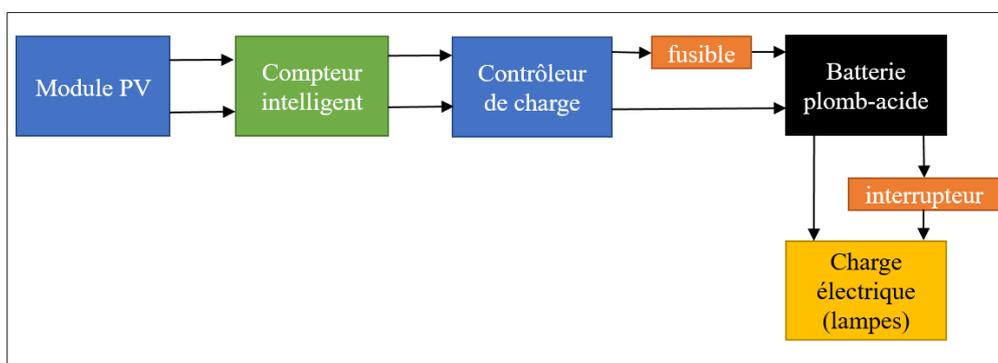


Figure 3.1 : Schéma bloc du système photovoltaïque autonome proposé

#### 3.2.1 Module photovoltaïque

Il Représente la source d'énergie de notre système. Il s'agit d'un module avec 36 cellules polycrystallines, le tableau suivant montre ses caractéristiques électriques :

modèle	100M(36)
Puissance maximale	100W
tolérance	$\pm 3\%$
Voltage à Pmax	18.35V
Courant à Pmax	5.45A
Voltage a circuit ouvert	22.7V
courant a circuit fermée	5.8A
Conditions standards de test	Éclairement : 1000W/m <sup>2</sup>
	coefficient de masse d'air : 1.5
	Température : 25 °C

Tableau 3.1 : Caractéristiques électriques de notre module photovoltaïque

### 3.2.2 Contrôleur de charge

Le contrôleur de charge solaire contient un convertisseur DC/DC qui gère la tension et le courant de charge de la batterie à partir du générateur solaire. Il garantit que la batterie n'est pas surchargée pendant la journée et que l'alimentation ne revient pas au générateur solaire pendant la nuit et ne décharge pas les batteries. Ce contrôleur particulier a une fonctionnalité supplémentaire qui est le contrôle d'éclairage LED.



**Figure 3.2 :** Contrôleur de charge utilisé dans notre système (LS102460LPLI)

Il s'agit d'un régulateur de type PWM (Pulse Width Modulation) qui est un modèle de base, et qui a uniquement pour rôle d'adapter la tension du générateur en envoyant une série de courtes impulsions de charge à la batterie (un signal carré). Le contrôleur vérifie constamment l'état de la batterie pour déterminer la fréquence des impulsions et le rapport cyclique appropriés selon le voltage de batterie. [43]

#### 3.2.2.1 Entrées et sorties

Le contrôleur possède des entrées/sorties pour atteindre ses fonctionnalités comme montré dans la figure suivante :



**Figure 3.3 :** Entrées et sorties de contrôleur de charge "LS102460LPLI"

- ① Indicateur LED d'état de charge
- ② Indicateur LED d'état de la batterie
- ③ Capteur de température
- ④ Fils positifs et négatifs de module PV
- ⑤ Fils positifs et négatifs de la batterie
- ⑥ Fils positifs et négatifs de la charge
- ⑦ Module récepteur infrarouge
- ⑧ LED infrarouge

Les composants devraient être connectés au contrôleur de charge dans l'ordre indiqué à la figure suivante :

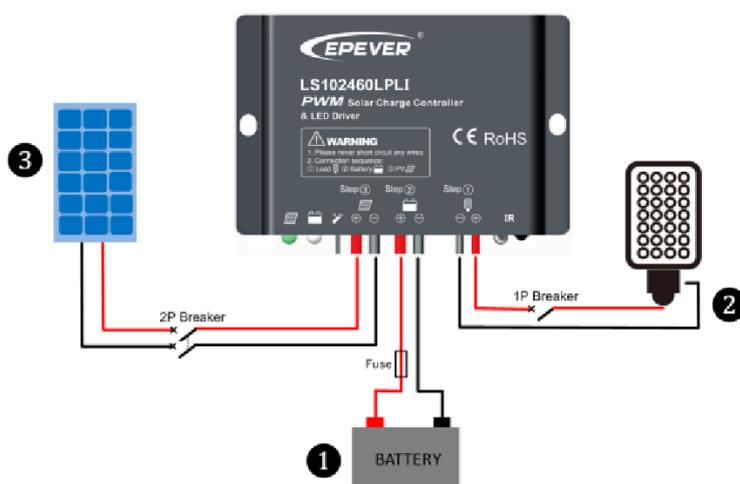


Figure 3.4 : Connexion des composants au contrôleur de charge "LS102460LPLI"

### 3.2.2.2 Spécifications techniques

Voltage nominal de système	12/24VDC
Courant de charge maximal	10A
Tension max. de circuit ouvert de module PV	50V
Plage de tension d'entrée de la batterie	9~32V
Puissance max. de sortie	30W/12V ou 60W/24V
Types de batteries supportés	plomb-acide / lithium
Plage de température toléré	-40~+50 °C
Boîtier	IP68 (1.5m,72h)
Poids net	0.21kg

Tableau 3.2 : Spécifications techniques du contrôleur de charge "LS102460LPLI"

### 3.2.2.3 Modes de fonctionnement

Le contrôleur offre plusieurs modes comme le mode par défaut qui allume les lampes LED lorsque les modules PV ne génèrent pas d'énergie (pendant la nuit) et les éteindre ailleurs (pendant le jour).

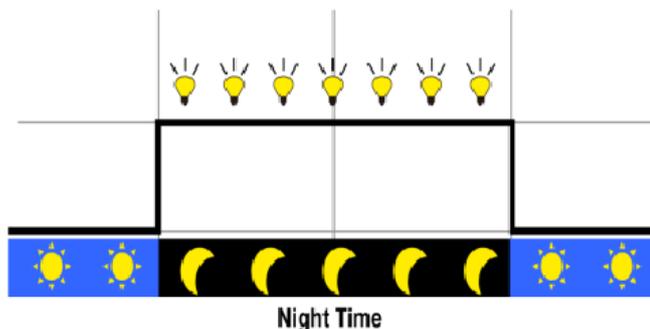


Figure 3.5 : Mode de fonctionnement par défaut du contrôleur de charge "LS102460LPLI"

### 3.2.3 Batterie plomb-acide

La batterie est l'élément qui permet au système photovoltaïque d'être autonome. Elle stock l'excès d'énergie produite par les générateurs pour être utilisée plus tard lorsque on en a besoin (à la nuit, en temps nuageux ...).

Il s'agit d'une batterie plomb-acide à cycle profond (c.à.d. qu'on peut la décharger à des pourcentages bas pour plusieurs cycles sans risquer de l'endommager contrairement aux batteries de voiture par exemple). Donc elle convient aux systèmes photovoltaïques autonomes et elle est moins chère que celle en lithium.



Figure 3.6 : La batterie plomb-acide utilisée dans notre système

Le tableau suivant montre ses caractéristiques électriques :

Capacité	124 Wh
Voltage nominal	12 V
Courant initial	Moins de 2.8 A
Voltage max pour utilisation en cycle	14.5~14.9 V (en 25 °C )
Voltage recommandé pour utilisation en veille (pour stocker)	13.6~13.8 V (en 25 °C )

Tableau 3.3 : Caractéristiques électriques de la batterie utilisée dans notre système

### 3.3 Description de l'architecture Hardware proposée du compteur d'énergie

Pour le compteur intelligent on propose l'architecture hardware illustrée dans la figure suivante :

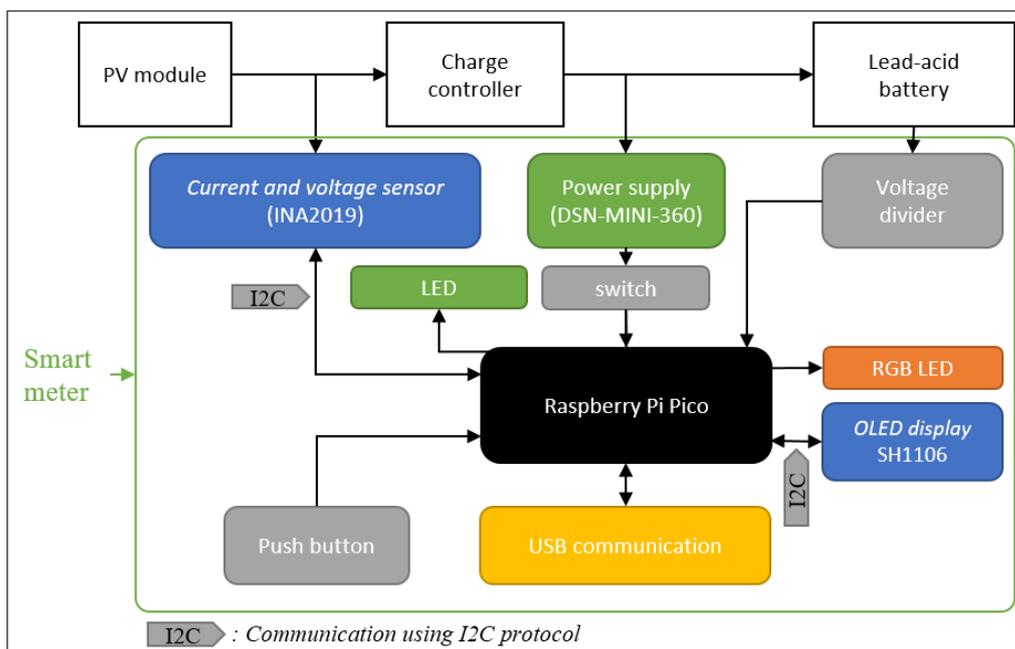


Figure 3.7 : Schéma bloc de l'architecture hardware du compteur proposé

Donc le schéma de branchement équivalent est le suivant :

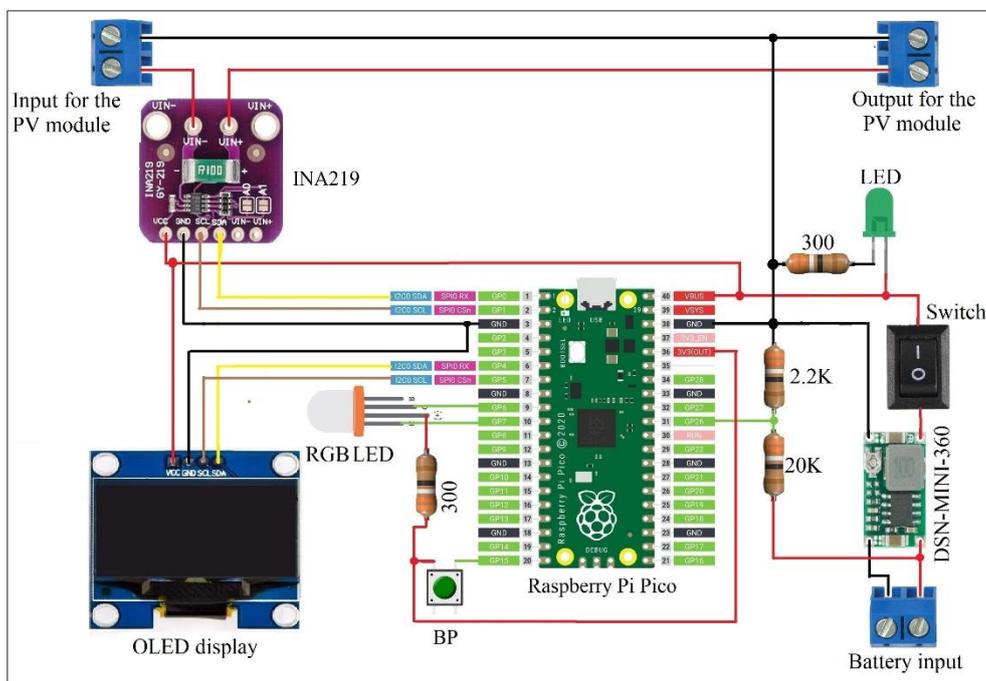


Figure 3.8 : Schéma de branchement de l'architecture du circuit proposé

### 3.3.1 Raspberry Pi Pico

Le Raspberry Pi Pico est une carte basée sur le microcontrôleur Raspberry Pi RP2040. Elle a été lancée en Janvier 2021 et conçue pour être une plate-forme de développement à faible coût et flexible pour le RP2040.

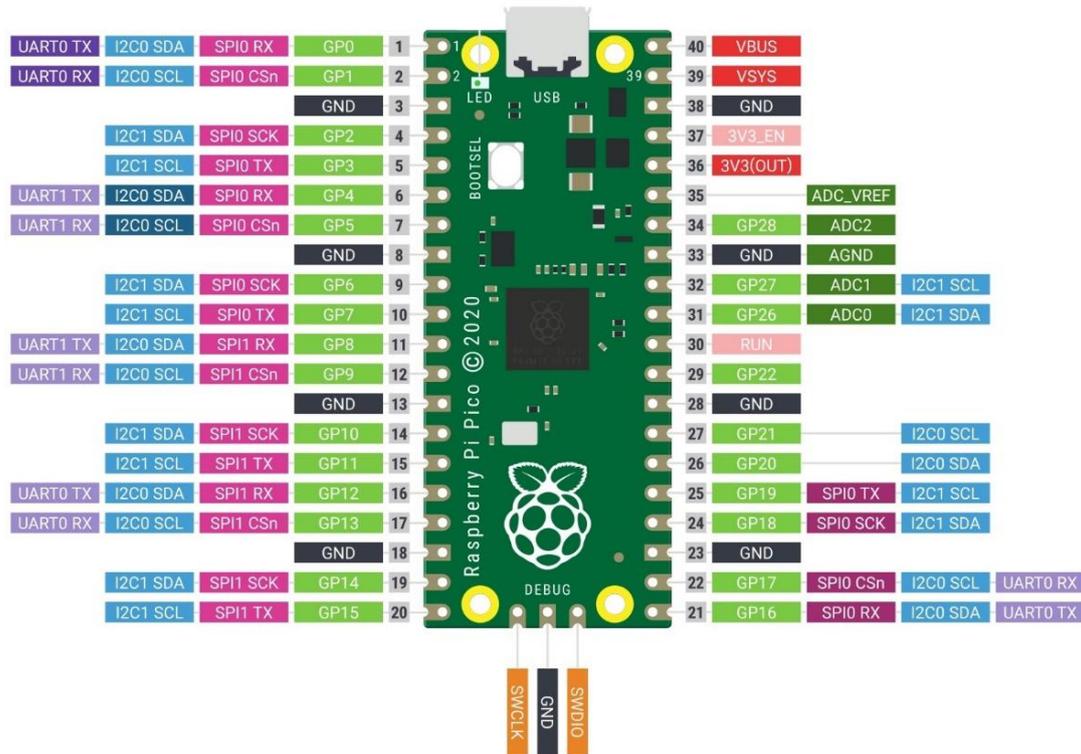


Figure 3.9 : Brochage du Raspberry Pi Pico [44]

Le tableau suivant montre ses spécifications techniques :

dimensions	21 mm × 51 mm
Type de CPU	Dual-core Arm Cortex-M0
Horloge	133 MHz
on-chip SRAM	264KB
on-board QSPI Flash	2MB
Entrées/sorties numériques	23
Entrées analogiques (ADC)	3
PWM channels	16
Entrées/sorties Programmable (PIO)	8 (distribuées entre 2 blocs)
Port USB	Port Micro-USB pour alimentation et programmation
Interfaces périphériques	2 × UART, 2 × SPI, 2 × I2C
Alimentation supportée	1.8–5.5V DC
Température de fonctionnement	-20°C to +85°C

Tableau 3.4 : Spécifications de la carte Raspberry Pi Pico

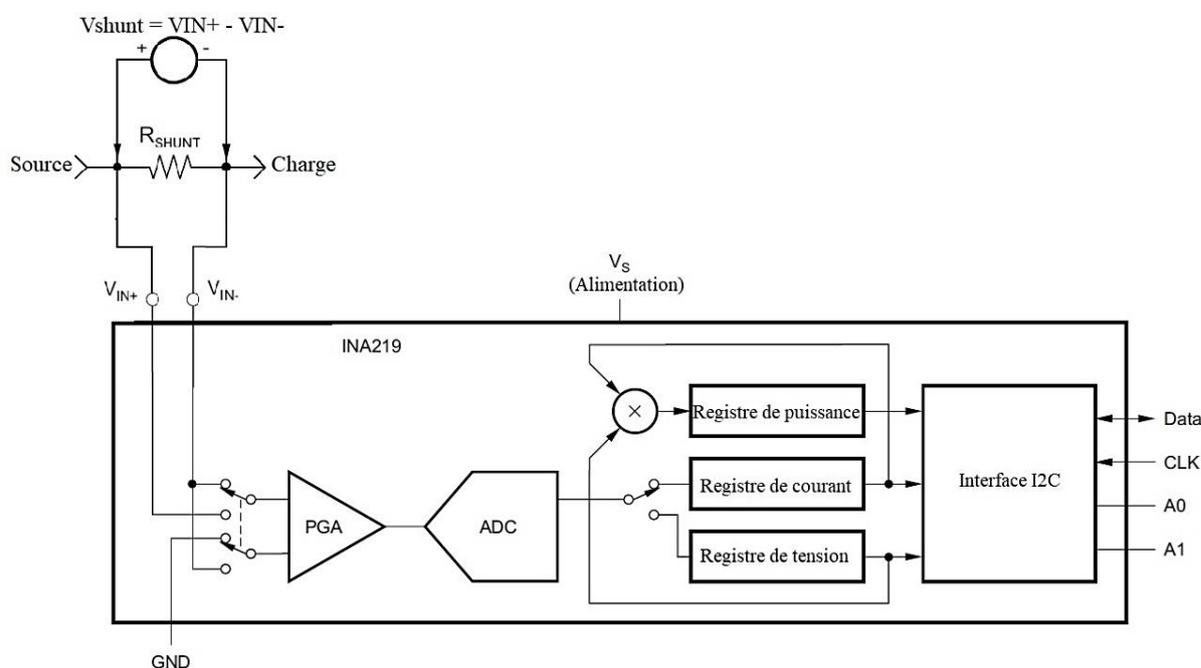
Le tableau suivant montre différents scénarios de consommation d'énergie de Pico en 25°C avec une alimentation de 5V :

Mode	description	Courant moyen (mA)
Popcorn	Il s'agit d'un démo du lecteur multimédia qui utilise la VGA, l'audio I2S et accès à la carte SD 4 bits.	86.5
BOOTSEL	Sert à faire la carte se monte comme un volume de stockage.	8.7
SLEEP	utilise le code binaire "hello_sleep" qui met le RP2040 dans un état de faible consommation	1.3
DORMANT	utilise le code binaire "hello_dormant" qui met le RP2040 dans un état de faible consommation (plus faible que SLEEP)	0.8

**Tableau 3.5 :** Consommation d'énergie par le Raspberry Pi Pico sous différents modes

### 3.3.2 Capteur INA219

L'INA219 est un capteur de courant à résistance shunt et en même temps un capteur de tension avec une interface I2C pour communiquer les données. Il stocke la valeur de courant en ampères dans le registre de courant et celle de tension en volt dans le registre de tension. Il a un registre multiplicateur supplémentaire qui calcule la puissance en watts en multipliant le courant et la tension. La figure suivante montre son schéma interne :



**Figure 3.10 :** Schéma interne de l'INA219

Le PGA est un amplificateur à gain programmable (programmable gain amplifier) qui sert à amplifier la tension d'entrée soit de la résistance shunt ou de la source ( $V_{bus}$ ) avec un gain convenable. Ensuite l'ADC de 12 bits convertit cette tension en valeur numérique.

Le tableau suivant résume les spécifications de l'INA219 :

Alimentation	De 3V a 5.5V
Plage de mesure de voltage	De 0 à 32V DC
Voltage max de Rshunt (Vshunt_max)	320mV
Erreur de gain en fonction de température	0.001% / 1°C
Résolution de l'ADC (12 bits)	Pour Vshunt : 10 $\mu$ V
	Pour Vbus : 4 mV
Erreur de mesure de tension Vbus	1%
Erreur de mesure de courant	1%

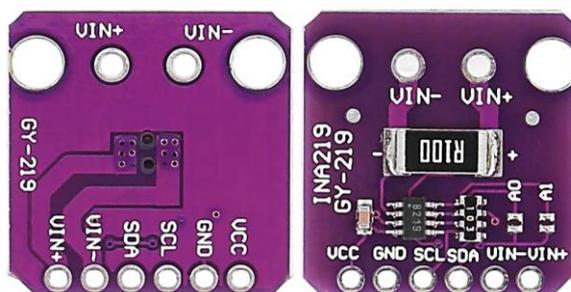
**Tableau 3.6 :** spécifications électriques de l'INA219

On remarque que le courant maximal  $I_{max}$  n'est pas mentionné, c'est parce qu'il dépend de la valeur de la résistance shunt  $R_{shunt}$  utilisée avec la relation suivante :

$$I_{max} = \frac{V_{shunt\_max}}{R_{shunt}} \quad (3.1)$$

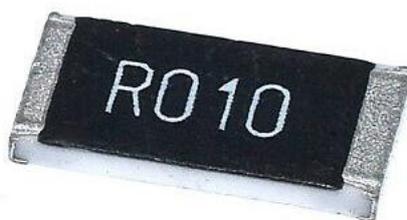
Le module disponible au marché vient avec une résistance shunt de 0.1 Ohm donc :

$$I_{max} = \frac{0.320}{0.1} = 3.2 \text{ Ampers} \quad (3.2)$$



**Figure 3.11 :** Le module utilisé de l'INA219

Cette valeur est inférieure au courant max de notre module photovoltaïque qui est plus de 5 Ampères. La solution est d'ajouter une résistance shunt  $R_2 = 0.01 \text{ Ohm}$  en parallèle avec la résistance existante  $R_1$  pour avoir une résistance équivalente  $R_{shunt\_eq}$  de plus faible valeur.



**Figure 3.12 :** Résistance shunt de 0.01 Ohm

On peut calculer  $R_{shunt\_eq}$  en utilisant l'équation suivante :

$$R_{shunt\_eq} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = \frac{0.1 \times 0.01}{0.1 + 0.01} \approx 0.009 \text{ Ohm} \quad (3.3)$$

Donc :

$$I_{max} = \frac{V_{shunt\_max}}{R_{shunt\_eq}} = \frac{0.320}{0.009} \approx 35.55 \text{ Ampers} \quad (3.4)$$

On note que cette valeur est la valeur max pour l'ADC de l'INA219, la résistance  $R_2$  que nous allons utiliser à un  $I_{max}$  de 14 Ampères, donc ça va être la valeur max pour notre compteur.

### 3.3.3 L'Afficheur OLED SH1106

Il s'agit d'un afficheur OLED 1.3 Inch avec une résolution de 132x64 et un contraste réglable. Il nécessite une alimentation entre 1.6V et 5V et vient avec une interface de communication I2C. Il a deux broches d'alimentation (GND et VCC) et deux autres broches (SCL et SDA) pour la communication avec le protocole I2C.



Figure 3.13 : Image de l'afficheur OLED SH1106

### 3.3.4 L'abaisseur de tension DSN-MINI-360

Il s'agit d'un abaisseur de tension de type DC-DC. La tension de sortie est réglable à l'aide d'un potentiomètre. Il supporte une tension d'entrée entre 4.75V et 23V et donne une tension de sortie entre 1V et 17V et un courant max de 1.8A. Donc il offre une alimentation stable et compatible avec le Raspberry Pi Pico et les autres composants du compteur.

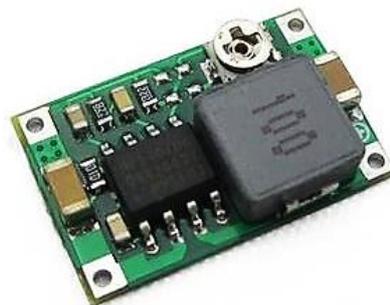


Figure 3.14 : L'abaisseur de tension DSN-MINI-360

### 3.3.5 Communication via USB

Pour la communication on va utiliser un câble USB. Comme on l'a utilisé pour téléverser notre programme au Raspberry Pi Pico on va l'utiliser pour obtenir un journal de données (data log) qui contient l'énergie produite pendant une période de temps.

Comme on a mentionné précédemment, la carte Pico a une mémoire flash de 2 Méga Octets donc on va l'utiliser pour stocker nos données sur des fichiers de type "fichier.txt" qu'on peut copier vers un ordinateur en utilisant l'environnement de développement Thonny avec les étapes suivantes [45] :

- 1) connecter le Pico a l'ordinateur via un câble USB
- 2) ouvrir Thonny puis ouvrir le fichier qui contient les données d'énergie en cliquant sur "open in Thonny". Par exemple on va ouvrir le fichier nommé "log\_de\_Eminute" qui contient l'énergie en mWh de chaque minute pendant une période de temps.

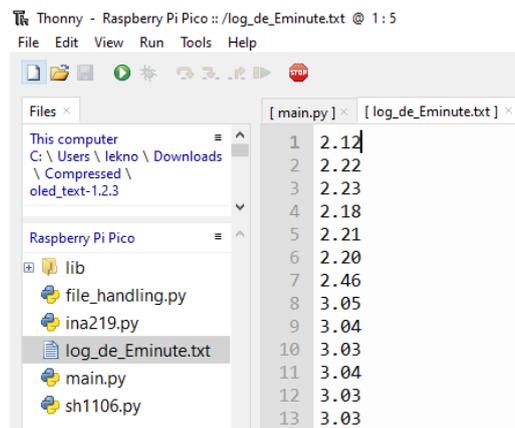


Figure 3.15 : Fichier log\_de\_Eminute.txt ouvert sur Thonny

- 3) maintenant on peut copier ces valeurs vers Excel pour les enregistrer comme un fichier "fichier.xlsx" sur l'ordinateur.

Une fois que le fichier Excel est enregistré on peut utiliser ce dernier pour tracer un graphe de nos données qui seront mieux visualisées.

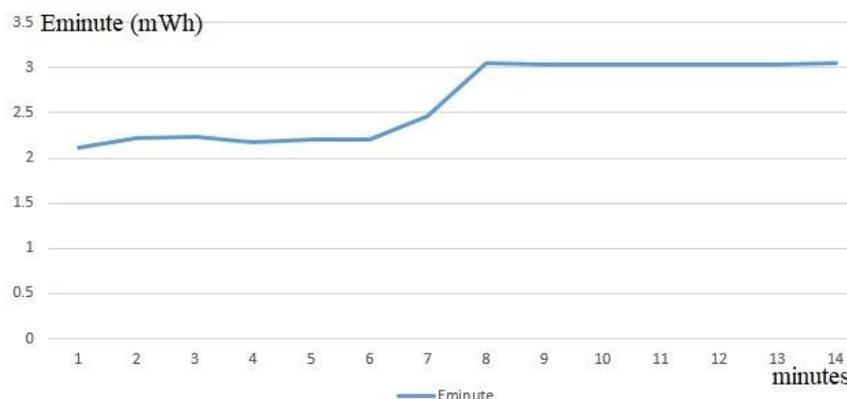


Figure 3.16 : Graphe de Eminute pendant 14 minutes

### 3.3.6 Le diviseur de tension et la LED RGB

Le diviseur de tension permet au Pico de mesurer la tension de la batterie  $V_{bat}$  à l'aide d'une entrée analogique de Raspberry Pi Pico pour allumer la LED RGB en rouge si la batterie est faible et en vert si elle n'est pas. Il est constitué d'une résistance  $R_1 = 20k\ Ohms$  et  $R_2 = 2.2k\ Ohms$ , on peut calculer  $V_{bat}$  à partir de l'équation suivante :

$$V_{bat} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{R2} \approx 10.09 V_{R2} \quad (3.5)$$

### 3.3.7 Les autres composants

- L'interrupteur sert à couper l'alimentation du compteur si nécessaire.
- La LED verte c'est une LED témoin pour indiquer l'existence d'alimentation.
- Le bouton poussoir (BP) sert à changer l'information à afficher sur l'afficheur OLED.

## 3.4 Présentation de l'outil de programmation

Thonny a été créé à l'Université de Tartu en Estonie comme un environnement de développement intégré pour Python conçu pour les débutants et supporte MicroPython. Il est disponible sur Windows, MacOS et Linux [46]. Depuis juin 2017, il est inclus par défaut dans la distribution officielle du système d'exploitation de Raspberry Pi OS. [47]

### 3.4.1 L'interface graphique

Thonny a une interface graphique simple composée principalement d'éditeur de programme, l'interface système (Shell), barre des menus et des icônes comme illustré dans la figure suivante :

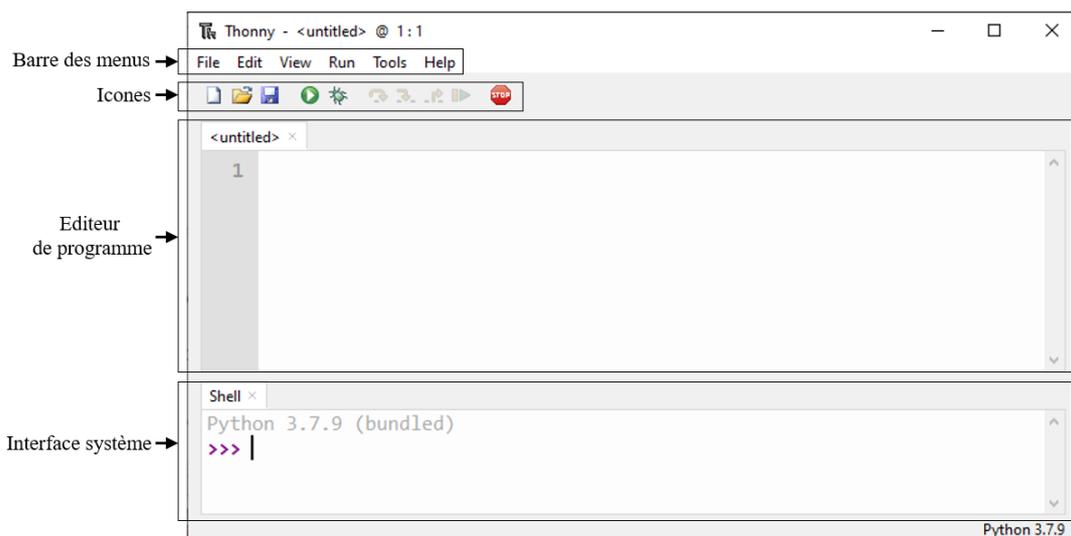


Figure 3.17 : Interface graphique de Thonny

Les icônes ont les fonctionnalités suivantes :

- |                                  |   |
|----------------------------------|---|
| (1) : créer un nouveau fichier   | (5) : Compiler le programme                                 |
| (2) : ouvrir un fichier existant | (6), (7), (8) : sert à exécuter le programme pas à pas      |
| (3) : sauvegarder le programme   | (9) : quitter l'exécution pas à pas et continue normalement |
| (4) : exécuter le programme      | (10) : arrêter l'exécution du programme                     |



**Figure 3.18** : Icônes de Thonny

### 3.4.2 Installation du micrologiciel (firmware) de MicroPython sur Raspberry Pi Pico

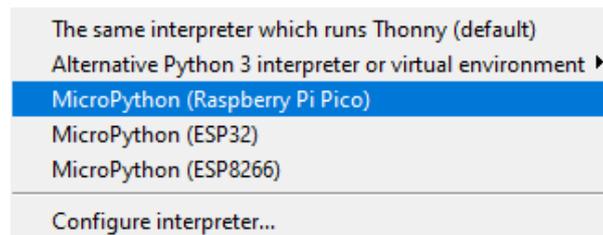
Pour ce faire, on débranche la carte, puis on maintient le bouton BOOTSEL poussé tout en connectant l'USB. Le Pico apparaîtra comme un périphérique de stockage de masse USB.

Dans le coin inférieur droit de la fenêtre Thonny, on verra la version de Python qu'on utilise actuellement.



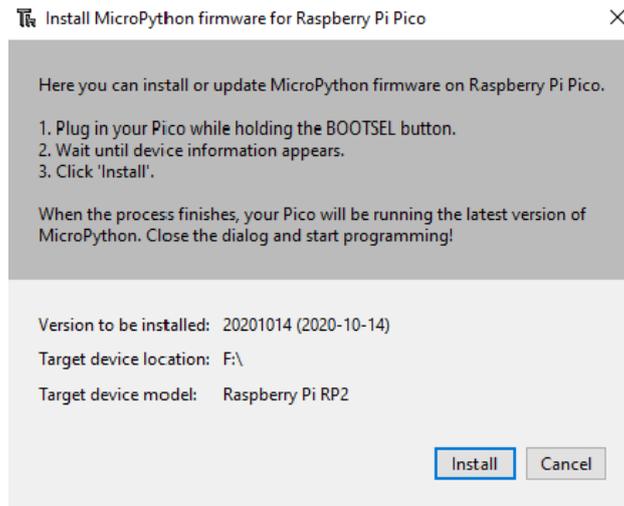
**Figure 3.19** : Version de Python sur Thonny

On clique sur la version Python et on choisit "MicroPython (Raspberry Pi Pico)" :



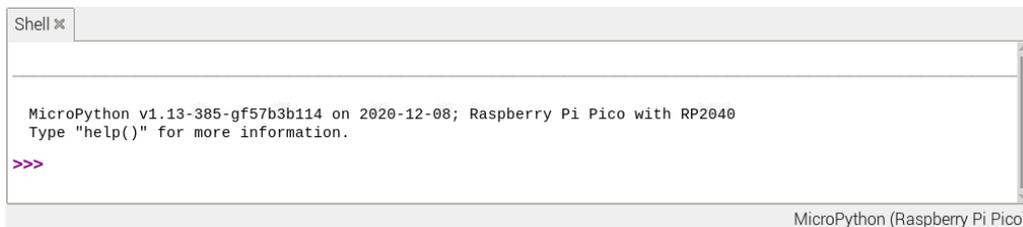
**Figure 3.20** : Choix de la carte sur Thonny

Une boîte de dialogue apparaît pour installer la dernière version du firmware MicroPython. On clique sur le bouton "Install" pour copier le firmware sur le Raspberry Pi Pico.



**Figure 3.21 :** Boîte de dialogue pour installer le firmware de MicroPython

On voit le message suivant sur l'interface système de Thonny :



**Figure 3.22 :** Message sur l'interface système après l'installation du firmware de MicroPython

Maintenant le Raspberry Pi Pico est prêt pour être programmé avec MicroPython.

### **3.5 Affichage des paramètres instantanés, (tension, courant et puissance générée)**

Pour afficher la tension, le courant et la puissance, on utilise l'algorithme suivant :

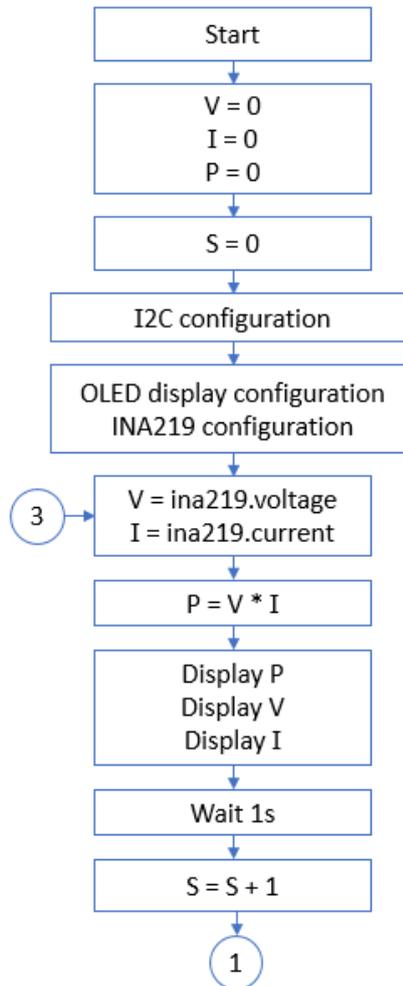


Figure 3.23 : Algorithme pour afficher la tension, le courant et la puissance

Remarques :

- La flèche numérotée (1) en bas de l'algorithme va vers l'algorithme suivant (algorithme de comptage d'énergie).
- La flèche numérotée (3) vient de la fin du dernier algorithme (algorithme d'affichage d'énergie avec options) pour réaliser une boucle infinie qui se répète chaque une seconde.

Le tableau suivant explique le rôle des variables et de certaines instructions :

Variable	rôle
V	Stocker la valeur de la tension
I	Stocker la valeur du courant
P	Stocker la valeur de la puissance
S	Compter les secondes qui passent
ina219.voltage	Sert à lire la tension à partir du registre de tension de l'INA219
ina219.current	Sert à lire le courant à partir du registre de courant de l'INA219

Tableau 3.7 : Rôle des variables et de certaines instructions de l'algorithme d'affichage des paramètres instantanés.

La figure suivante est un exemple d'affichage des paramètres instantanés sur l'afficheur OLED :



**Figure 3.24 :** Affichage de la tension, le courant et la puissance sur l'afficheur OLED

### 3.6 Algorithme de comptage et affichage d'énergie

Pour rendre l'algorithme plus facile à comprendre on le décompose en deux parties :

#### 3.6.1 Comptage d'énergie

D'abord on présente le tableau suivant qui explique le rôle des variables et de certaines instructions utilisées dans cet algorithme :

Variable	Rôle
Etotal	Compter l'énergie produite totale
Einstant	Pour calculer l'énergie instantanée (pendant une seconde)
Eminute_in_progress	Compter l'énergie produite dans la minute actuelle (en cours)
Eminute	Stocker la valeur d'énergie produite pendant la minute précédente
Ehour_in_progress	Compter l'énergie produite dans l'heure actuelle (en cours)
Ehour	Stocker la valeur d'énergie produite pendant l'heure précédente
Eday_in_progress	Compter l'énergie produite dans le jour actuel (en cours)
Eday	Stocker la valeur d'énergie produite pendant le jour précédent
Emonth_in_progress	Compter l'énergie produite dans le mois actuel (en cours)
Emonth	Stocker la valeur d'énergie produite pendant le mois précédent
L'opérateur modulo "%"	Calculer le reste de la division d'un nombre par un autre

**Tableau 3.8 :** Rôles des variables et de certaines instructions de l'algorithme de comptage d'énergie.

On reprend notre algorithme à partir de la fin de l'algorithme précédent (Affichage des paramètres instantanés) :

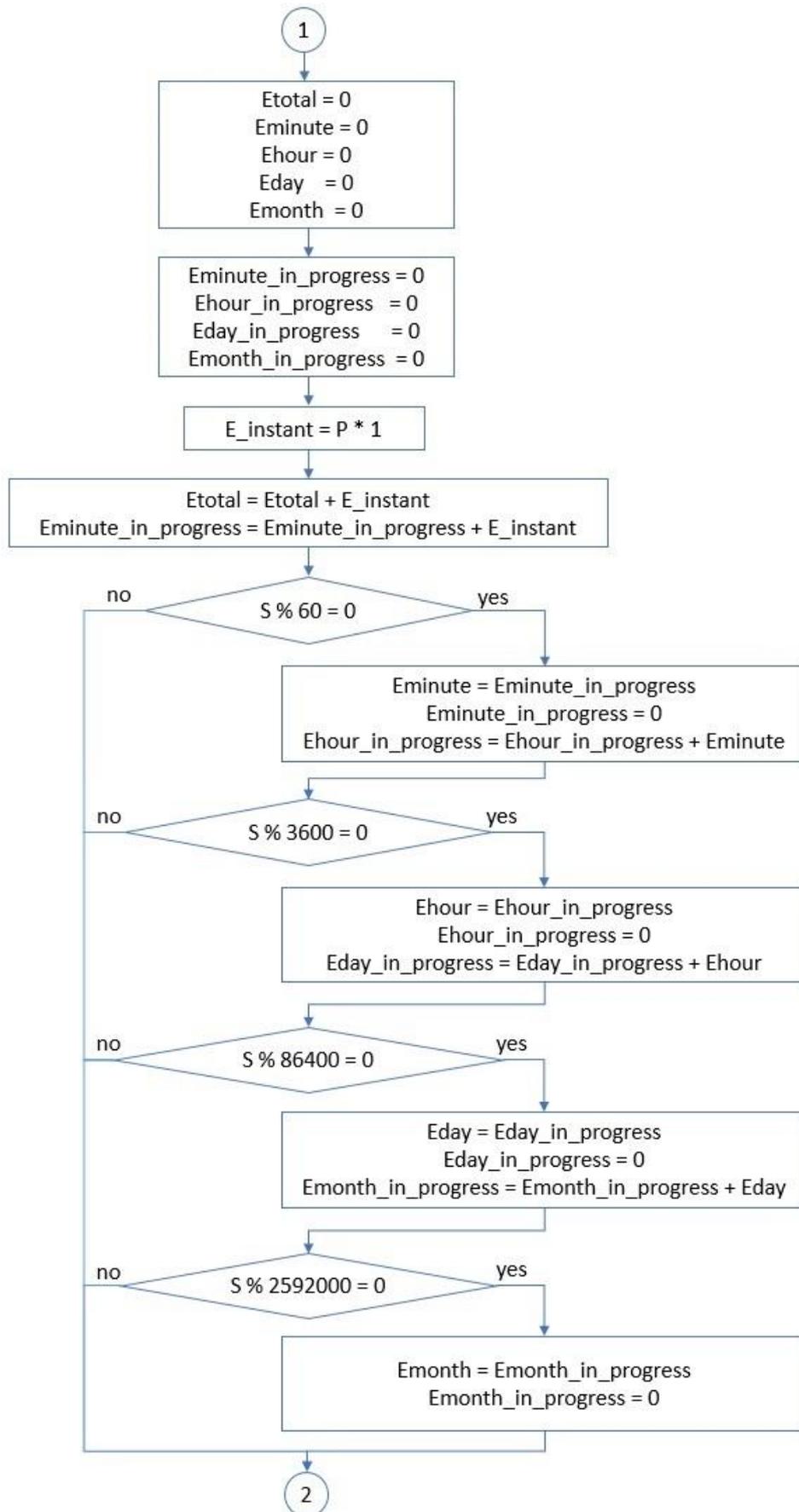


Figure 3.25 : Algorithme de comptage d'énergie

Remarques :

- La flèche numérotée (1) vient de l'algorithme précédent (algorithme d'affichage des paramètres instantanés).
- La flèche numérotée (2) va vers l'algorithme suivant (algorithme d'affichage d'énergie avec options).
- "86400" est le nombre des secondes dans un jour ( $86400 = 3600 * 24$ )
- "2592000" est le nombre des secondes dans un mois ( $2592000 = 86400 * 30$ )
- Lorsque le reste de la division de la variable S (nombre des secondes passées) par le nombre des secondes dans un mois (par exemple) égale à zéro on détermine qu'un mois a passé.

### 3.6.2 Affichage d'énergie avec option

On affiche Ejour et Etotale directement mais pour afficher Eminute, Eheure et Emois il nous reste une seule ligne sur l'afficheur OLED, donc on utilise un bouton poussoir (BP) pour basculer entre les modes d'affichage.

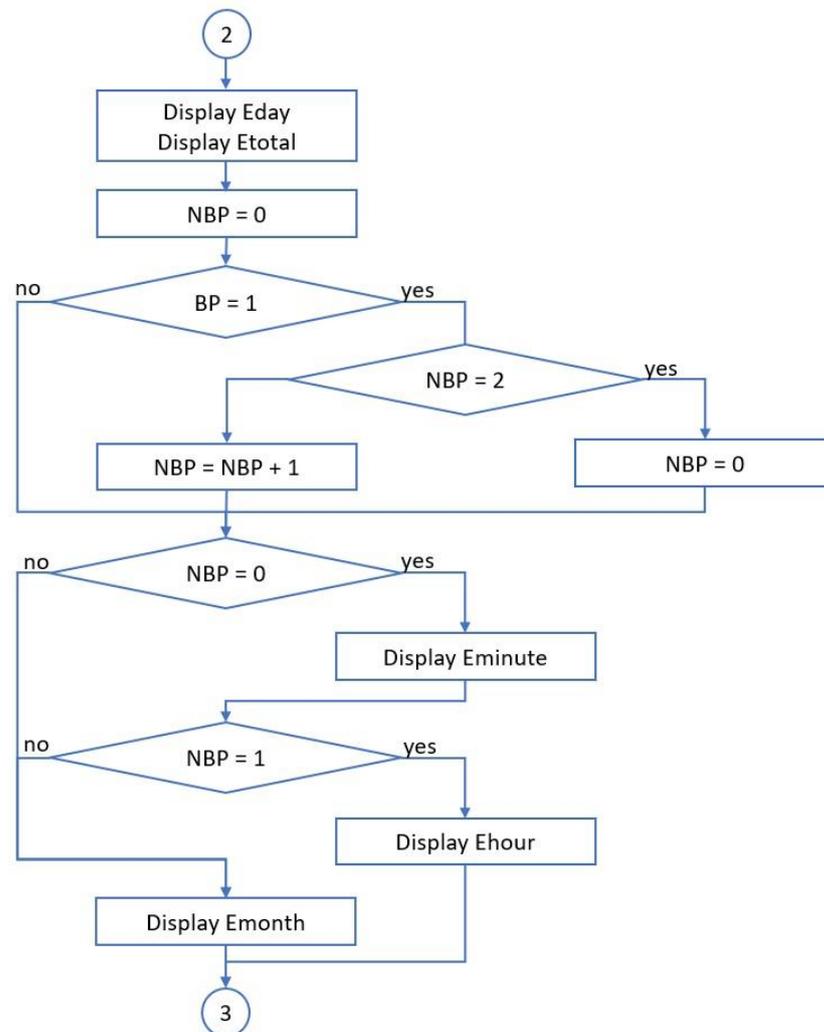


Figure 3.26 : Algorithme d'affichage d'énergie avec option

Remarque : NBP s'incrémente lorsque BP est poussé.

La figure suivante est un exemple d'affichage d'énergie sur l'afficheur OLED :



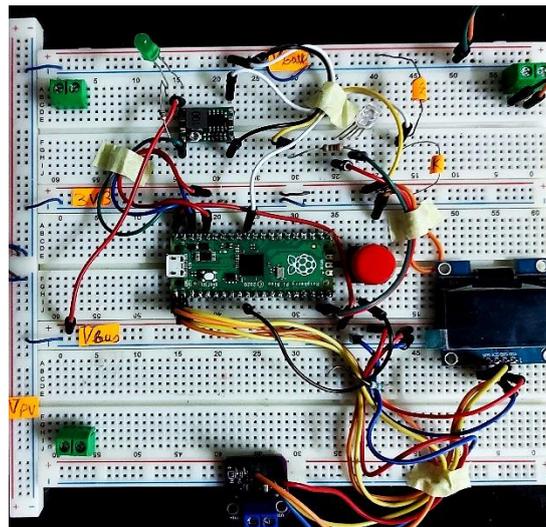
**Figure 3.27 :** Affichage d'énergie sur l'afficheur OLED avec option de basculement

### 3.7 Réalisation du compteur

Pour réaliser notre compteur on a passé par trois étapes principales :

#### 3.7.1 Utilisation de la plaque d'essai

La plaque d'essai nous permet d'essayer facilement différents composants et branchements pour arriver à la configuration qui satisfait nos besoins. La figure suivante montre la plaque d'essai avec notre branchement final de composants :



**Figure 3.28 :** Branchement finale des composants de compteur sur la plaque d'essai.

#### 3.7.2 Conception du circuit imprimé (PCB)

Après avoir compléter nos essais on a fait la conception du circuit imprimé (PCB) à l'aide de KiCad qui est une suite logicielle libre de conception pour l'électronique.

D'abord on a dessiné notre schéma électronique comme montre dans la figure suivante :

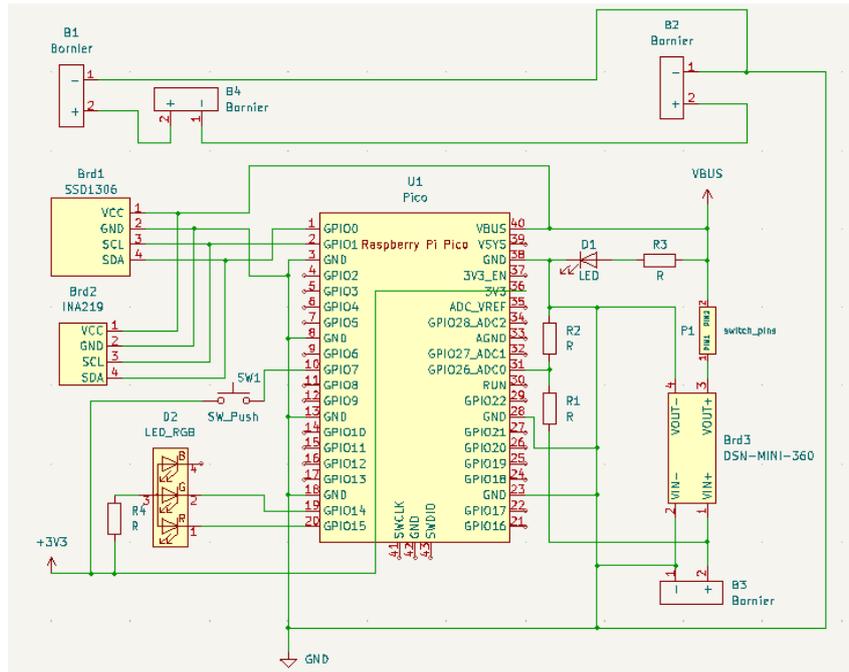


Figure 3.29 : Schéma électronique de notre compteur sous KiCad

Ensuite on a conçu le circuit imprimé à partir du schéma électronique précédent. Voir la figure suivante :

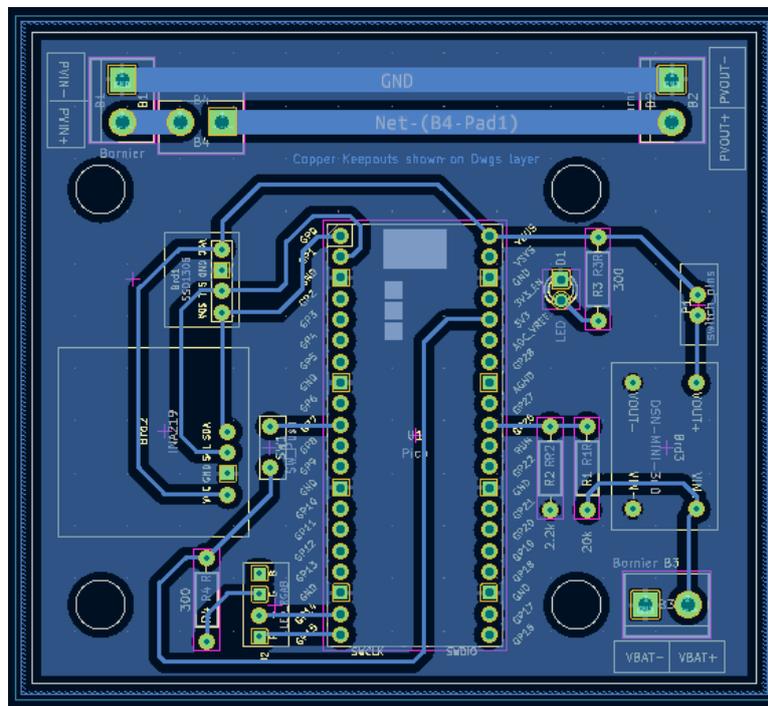
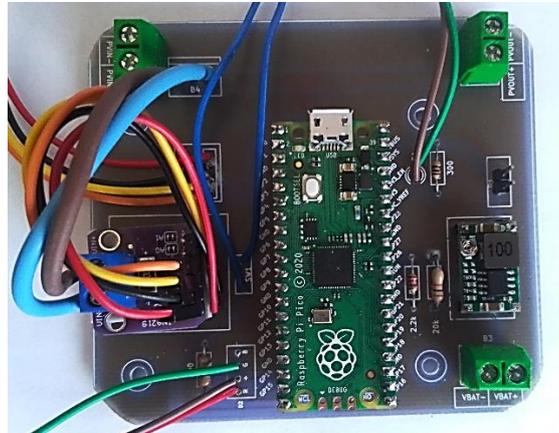


Figure 3.30 : Circuit imprimé du compteur conçu sous KiCad

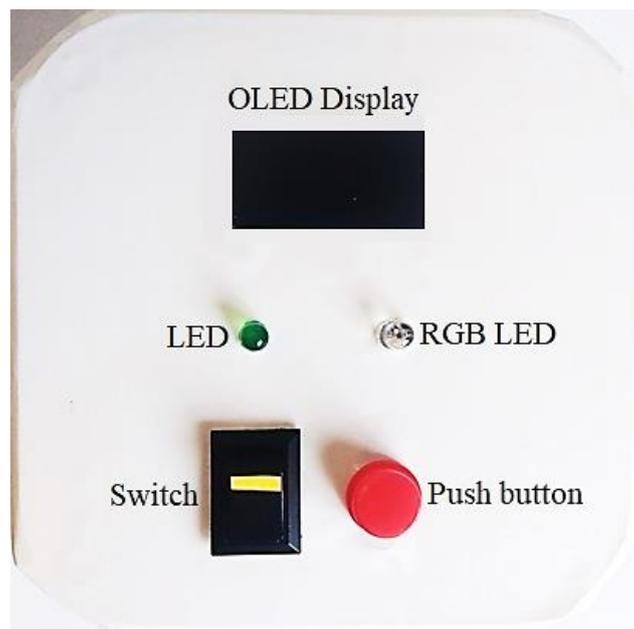
### 3.7.3 Soudage des composants et assemblage dans un boîtier

Dans cette étape on a soudé les jumpers de branchement et les composants sur le circuit imprimé comme il est montré dans la figure suivante :



**Figure 3.31 :** Soudage des composants et des jumpers sur le circuit imprimé

Ensuite on a assemblé tous les composants dans un boîtier comme montre la figure suivante :



**Figure 3.32 :** Assemblage des composants dans un boîtier

### 3.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté notre système photovoltaïque autonome qui est constitué d'un module photovoltaïque, d'une batterie, d'une charge DC et d'un compteur d'énergie électrique. On a aussi présenté l'architecture hardware de ce dernier qui se base sur la carte Raspberry Pi Pico qu'on a programmé avec l'environnement de développement Thonny en utilisant MicroPython.

Ensuite nous avons démontré l'algorithme utilisé pour afficher la tension, le courant et la puissance ainsi que compter et afficher l'énergie selon plusieurs intervalles de temps (minute, heure, jour et mois).

Enfin on a présenté la réalisation du compteur commençant par la plaque d'essai et passant par la conception du circuit imprimé PCB et arrivant au soudage des composants et l'installation du tout dans un boîtier.

## *Chapitre 4*

# *Tests expérimentaux et validation des résultats*

## 4.1 Introduction

Après l'étape de réalisation de chaque système embarqué il est important d'exécuter plusieurs tests pour valider son fonctionnement et déterminer la fiabilité de ces composants.

Dans ce chapitre nous allons effectuer des mesures électriques sur le système photovoltaïque, et ensuite nous allons brancher le compteur au système pour tester sa précision et voir l'influence de la charge et du générateur photovoltaïque sur les paramètres à mesurer.

Ainsi, nous allons enregistrer les données collectées pendant une heure afin de créer un journal sous format Excel et de tracer la courbe de la production d'énergie.

## 4.2 Mesures électriques sur le système photovoltaïque

On a fait ces mesures sous les conditions générales suivantes :

- Localisation : Frantz Fanon, Faculté de technologie, Boumerdès
- Date : 18/05/2022
- Température (selon la météo) : 23°C

On organise les mesures sur notre système photovoltaïque autonome en quatre parties :

### 4.2.1 Mesure de la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et du courant en court-circuit ( $I_{cc}$ )

On a fait cette partie avec un seul module photovoltaïque sous les conditions spécifiques suivantes :

- Heure : 14:18
- Orientation : vers le Sud
- Angle d'inclination :  $\sim 45^\circ$

On a obtenu les valeurs suivantes :  $V_{co} = 20,8 \text{ v}$   
 $I_{cc} = 5,35 \text{ A}$



**Figure 4.1** : Mesure de  $V_{co}$  et  $I_{cc}$  d'un seul module photovoltaïque incliné de  $45^\circ$

### 4.2.2 Influence de l'inclinaison et de l'orientation sur $I_{cc}$

La tension en circuit ouvert reste quasiment constante en fonction de l'orientation et de l'inclinaison du module, donc on s'intéresse uniquement aux mesures de  $I_{cc}$ .

#### 4.2.2.1 Influence de l'inclinaison

Conditions spécifiques à ce test :

- Heure : 14 :40
- Orientation : vers le Sud

On fait varier l'angle d'inclinaison du module photovoltaïque avec un pas de  $15^\circ$  :

Angle ( $^\circ$ )	$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$	$90^\circ$
$I_{cc}$ (A)	5,45	5,64	5,61	4,9	4,5	3,5	2,5

**Tableau 4.1** : Influence de l'inclinaison du module photovoltaïque sur  $I_{cc}$

#### 4.2.2.2 Influence de l'orientation

Conditions spécifiques à ce test :

- Heure : 14 :51
- Angle d'inclinaison :  $\sim 45^\circ$

On fait varier l'orientation du module photovoltaïque entre l'Est et l'Ouest :

Orientation	Est	Sud-Est	Sud	Sud-Ouest	Ouest
$I_{cc}$ (A)	2,07	3,33	5,2	5,9	5,7

**Tableau 4.2** : Influence de l'orientation du module photovoltaïque sur  $I_{sc}$

### 4.2.3 Mesure de $I_{cc}$ et $V_{co}$ en branchement série et en branchement parallèle

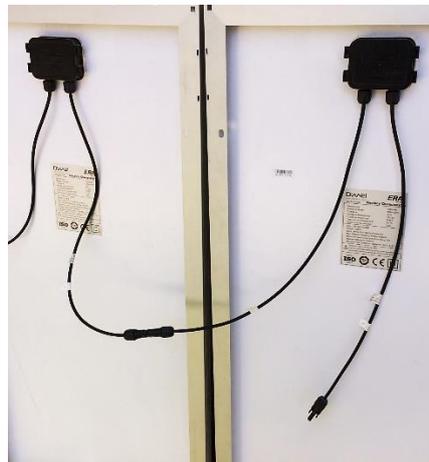
Dans cette partie on mesure  $I_{cc}$  et  $V_{co}$  en branchement série et en branchement parallèle de deux modules photovoltaïques sous les conditions suivantes :

- Heure : 15 :15
- Angle d'inclinaison :  $\sim 45^\circ$
- Orientation : vers le Sud



**Figure 4.2 :** Deux modules photovoltaïques inclinés de  $\sim 45^\circ$

On a obtenu les valeurs suivantes pour le branchement en sérié :  $V_{co} = 41,5 \text{ V}$   
 $I_{cc} = 4,3 \text{ A}$



**Figure 4.3 :** Branchement en série des deux modules photovoltaïques

Afin de brancher les deux modules photovoltaïques en parallèle on utilise des connecteurs de type MC4 :



**Figure 4.4 :** Connecteur MC4 utilisé pour brancher les deux modules photovoltaïques en parallèle

On a obtenu les valeurs suivantes pour le branchement parallèle :  $V_{co} = 20.8 \text{ V}$   
 $I_{cc} = 8,99 \text{ A}$

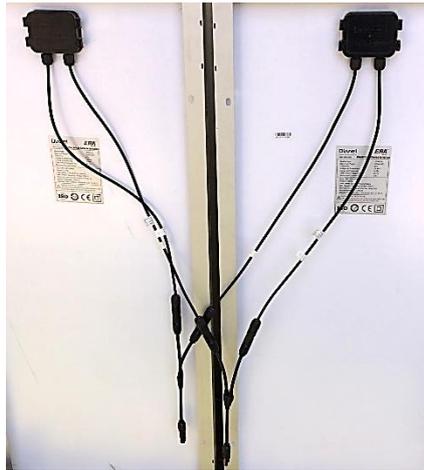


Figure 4.5 : Branchement en parallèle des deux modules photovoltaïques

#### 4.2.4 Branchement du Système

Conditions spécifiques :

- Heure : 15 :30
- Angle d'inclinaison :  $\sim 45^\circ$
- Orientation : vers le Sud

On branche un module photovoltaïque, la batterie et la lampe au contrôleur de charge et on mesure les paramètres suivants :

- $V_{bat\_à\_vide} = 12,6 \text{ V}$
- $V_{bat\_en\_charge} = 14,3 \text{ V}$
- $V_{pv} = 15,2 \text{ V}$
- $I_{pv} = 3,4 \text{ A}$

Avec :

$V_{bat\_à\_vide}$  : Tension de la batterie isolée

$V_{bat\_en\_charge}$  : Tension de la batterie branchée au système

$V_{pv}$  : Tension du module photovoltaïque

$I_{pv}$  : Courant produit par le module photovoltaïque



Figure 4.6 : Branchement du système photovoltaïque

### 4.3 Branchement du compteur au système

Dans cette étape nous avons branché le compteur avec les autres composants qui sont : le contrôleur de charge, la batterie et la lampe et nous avons isolé le module PV afin d'effectuer des mesures à l'aide d'une source de tension dans le laboratoire comme il est montré sur la figure suivante :

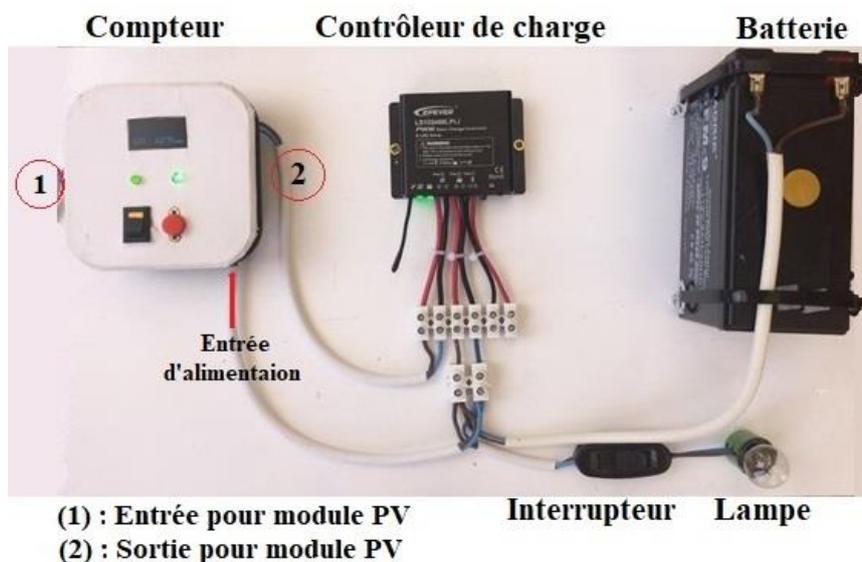


Figure 4.7 : Branchement du compteur au système

### 4.4 Tests sous différentes conditions

Après avoir branché le compteur au système nous avons effectué plusieurs tests afin de valider son fonctionnement et tester sa fiabilité.

#### 4.4.1 Test de l'indicateur "batterie faible" (LED RGB)

Pour tester que la LED RGB (qui serve comme un indicateur de batterie faible) fonctionne comme prévu on doit faire un test mais il n'est pas conseillé de décharger la batterie pour faire ce test, donc nous avons utilisé une alimentation stabilisée avec une tension réglable pour simuler la batterie.

On a programmé le Raspberry Pi Pico pour allumer la LED RGB en rouge si la tension de la batterie est strictement inférieure à 12.2V et en vert si elle est supérieure ou égale à 12.2V. La figure suivante montre le résultat du test :



Si  $V_{\text{batterie}} < 12.2V$  | Si  $V_{\text{batterie}} \geq 12.2V$

Figure 4.8 : Test de l'indicateur "batterie faible" (LED RGB)

#### 4.4.2 Test de la précision du compteur

D'abord on cite les conditions du test :

- Localisation : Frantz Fanon, Faculté de technologie, Boumerdès
- Date : 16/06/2022
- Heure : 13:21
- Inclinaison du module PV :  $\sim 45^\circ$
- Orientation du module PV : Sud-Ouest
- Température :  $31^\circ\text{C}$

Pour tester la précision du compteur on l'a branché au système photovoltaïque autonome avec un seul module photovoltaïque à l'entrée avec différentes charges électriques (batterie et des lampes de 21 Watts) à la sortie. On a aussi utilisé un multimètre pour mesurer la tension  $V_{pv}$  et le courant  $I_{pv}$  afin de comparer les mesures obtenues du compteur avec celles obtenues du multimètre, voir le branchement à la figure suivante :



Figure 4.9 : Banc d'essais dans le laboratoire

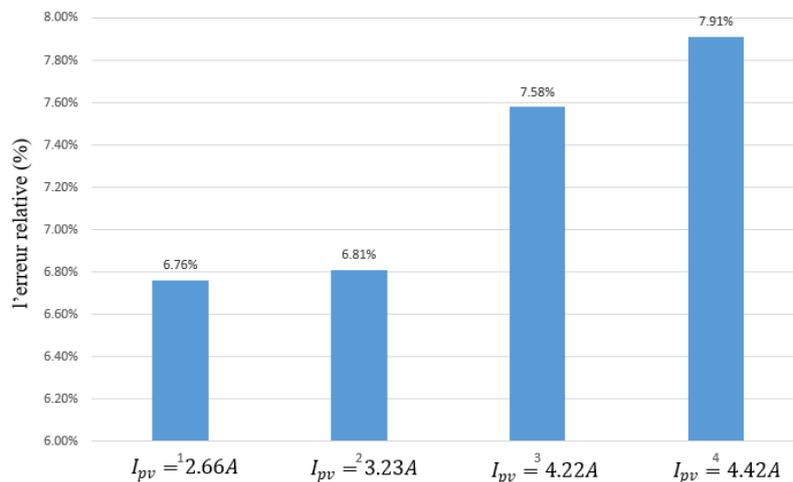
	Batterie unique	Batterie et une seule lampe	Batterie et deux lampes	Batterie et trois lampes
$V_{pv,compteur}$ (V)	16.90	16.21	14.15	13.40
$V_{pv,référence}$ (V)	17.0	16.30	14.23	13.47
$\delta V_{pv}$	0.58%	0.52%	0.56%	0.51%
$I_{pv,compteur}$ (A)	2.84	3.45	4.54	4.77
$I_{pv,référence}$ (A)	2.66	3.23	4.22	4.42
$\delta I_{pv}$	6.76%	6.81%	7.58%	7.91%

**Tableau 4.3 :** Comparaison des mesures effectuées par le compteur et le multimètre

Avec :

- $V_{pv,compteur}$  : Tension du module photovoltaïque mesurée par le compteur
- $V_{pv,référence}$  : Tension du module photovoltaïque mesurée par le multimètre
- $\delta V_{pv}$  : Erreur relative de mesure de  $V_{pv}$   $\delta V_{pv} = \frac{V_{pv,compteur} - V_{pv,référence}}{V_{pv,référence}}$
- $I_{pv,compteur}$  : Courant généré par le module photovoltaïque et mesuré par le compteur
- $I_{pv,référence}$  : Courant généré par le module photovoltaïque et mesuré par le multimètre
- $\delta I_{pv}$  : Erreur relative de mesure de  $I_{pv}$   $\delta I_{pv} = \frac{I_{pv,compteur} - I_{pv,référence}}{I_{pv,référence}}$

On remarque que l'erreur relative de  $V_{pv}$  est petite et acceptable pour notre application, par contre  $\delta I_{pv}$  est grande et proportionnelle à  $I_{pv}$  c'est-à-dire lorsque  $I_{pv}$  augmente,  $\delta I_{pv}$  augmente aussi. Voir la figure suivante :



**Figure 4.10 :** Erreur relative de  $I_{pv}$  pour chaque mesure de courant

Cette erreur est due au phénomène d'auto-échauffement de la résistance shunt du capteur de courant selon la loi de Joule ( $P = RI^2$ ) ce qui entraîne une augmentation de la résistance shunt ( $R_{sh}$ ) proportionnellement à l'augmentation du courant  $I_{pv}$  selon l'équation suivante [48] :

$$R_{sh}(I_{pv}) = R_{sh0} (1 + \alpha \Delta T_{amb}) + \alpha R_{th} R_{sh0}^2 I_{pv}^2 \quad (4.1)$$

Avec :

- $R_{sh0}$  : Résistance du shunt lorsque  $I_{pv} = 0$  , donc c'est la valeur calculée au chapitre 3 ( $R_{sh0} = 0.009 \text{ Ohms}$ )
- $\alpha$  : Coefficient de température de la résistance shunt utilisée donné en " $ppm/1^\circ\text{C}$ ", il signifie que  $R_{sh}$  augmente pour chaque augmentation de  $1^\circ\text{C}$  de la température de la résistance shunt.
- $\Delta T_{amb}$  : Variation de la température ambiante,  $\Delta T_{amb} = T_{amb} - T_0$  . Pour simplifier les calculs on suppose que  $\Delta T_{amb}$  est constant.
- $R_{th}$  : Résistance thermique entre la résistance shunt et l'environnement

A partir de l'équation précédente on trouve l'expression de la tension aux bornes de la résistance shunt ( $V_{sh}$ ) :

$$V_{sh} = R_{sh}(I_{pv}) I_{pv} = R_{sh0} (1 + \alpha \Delta T_{amb}) I_{pv} + \alpha R_{th} R_{sh0}^2 I_{pv}^3 \quad (4.2)$$

Notre compteur détermine le courant  $I_{pv,compteur}$  à l'aide du capteur de courant (INA219) en divisant  $V_{sh}$  par  $R_{sh0}$  :

$$I_{pv,compteur} = \frac{V_{sh}}{R_{sh0}} \quad (4.3)$$

On substitue  $V_{sh}$  par son expression :

$$I_{pv,compteur} = (1 + \alpha \Delta T_{amb}) I_{pv} + \alpha R_{th} R_{sh0} I_{pv}^3 \quad (4.4)$$

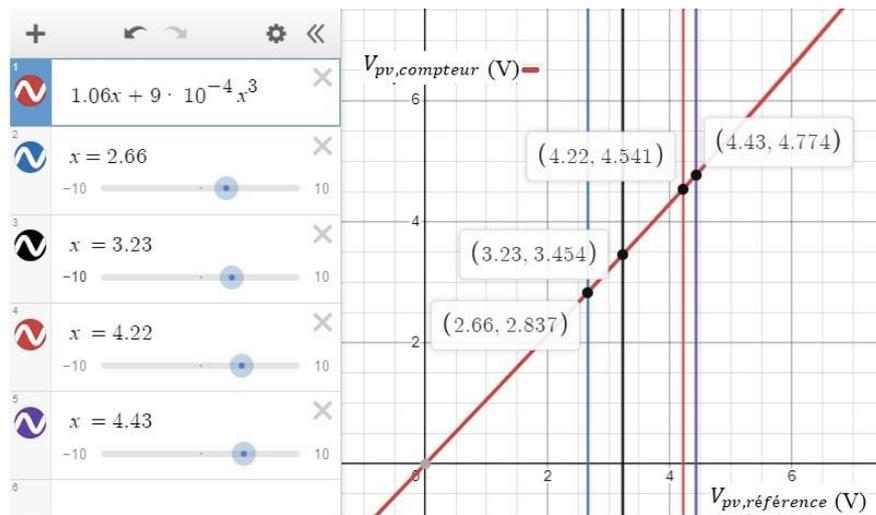
Avec :

$I_{pv}$  : Valeur réelle du courant généré par le module photovoltaïque

On pose  $a_1 = 1 + \alpha \Delta T_{amb}$  et  $a_3 = \alpha R_{th} R_{sh0}$  :

$$I_{pv,compteur} = a_1 I_{pv} + a_3 I_{pv}^3 \quad (4.5)$$

Comme on n'a pas les informations et le matériel pour déterminer les valeurs de  $a_1$  et  $a_3$  on a utilisé une calculatrice graphique en ligne. On a inséré l'équation précédente et on fait varier les valeurs de  $a_1$  et  $a_3$  jusqu'à ce que le graphe obtenu vérifie les valeurs mesurées précédemment de  $I_{pv,compteur}$  et  $V_{pv,référence}$  (dans le tableau 4.3) :



**Figure 4.11** : Détermination des valeurs de  $a_1$  et  $a_3$  à partir des valeurs de  $I_{pv,compteur}$  et  $V_{pv,référence}$  mesurés précédemment à l'aide d'une calculatrice graphique

Ce graphe représente  $I_{pv,compteur}$  en fonction de  $V_{pv,référence}$  selon la fonction  $f(x) = a_1 x + a_3 x^3$  où :  $f(x)$  est  $I_{pv,compteur}$  et  $x$  est  $V_{pv,référence}$ . Les droites  $x = 2.66$ ,  $x = 3.23$ ,  $x = 4.22$  et  $x = 4.43$  représentent les valeurs de  $V_{pv,référence}$  mesurées dans le tableau 4.3, donc les ordonnées des point d'intersection entre ces droite et le graphe (2.83, 3.45, 4.54 et 4.77) représentent les valeurs de  $I_{pv,compteur}$  mesurées dans le même tableau.

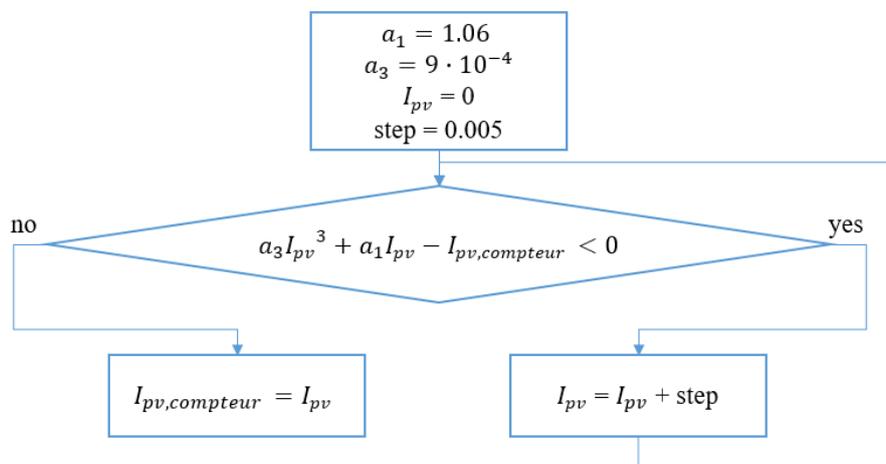
Alors on trouve que  $a_1 = 1.06$  et  $a_3 = 9 \cdot 10^{-4}$ , on substitue ces valeurs dans l'équation précédente :

$$I_{pv,compteur} = 1.06I_{pv} + 9 \cdot 10^{-4}I_{pv}^3 \tag{4.6}$$

On peut écrire cette équation sous la forme suivante :

$$9 \cdot 10^{-4}I_{pv}^3 + 1.06I_{pv} - I_{pv,compteur} = 0 \tag{4.7}$$

Donc elle s'agit d'une équation de 3ème ordre qu'on peut résoudre pour calculer le courant  $I_{pv}$  à partir du courant mesuré par notre compteur en utilisant l'algorithme suivant :



**Figure 4.12** : Algorithme utilisé pour trouver la valeur réelle du courant  $I_{pv}$  à partir de la valeur mesurée par le capteur de courant (INA219)

Explication : l'algorithme incrémente  $I_{pv}$  par un pas (step) de 0.005 ampères jusqu'à ce que sa valeur donne une solution à l'équation (4.7), ensuite la valeur précédente de  $I_{pv,compteur}$  est remplacée par la valeur de  $I_{pv}$  et par conséquent la mesure est corrigée.

On applique cet algorithme sur les valeurs mesurées précédemment :

$I_{pv,compteur}$ (A)	2.67	3.23	4.22	4.43
$I_{pv,référence}$ (A)	2.66	3.23	4.22	4.42
$\delta I_{pv}$	0.37%	0%	0%	0.37%

**Tableau 4.4 :** Valeurs de  $I_{pv,compteur}$  après l'application de l'algorithme de correction comparées aux valeurs de  $I_{pv,référence}$

On remarque une réduction importante de l'erreur relative.

#### 4.4.3 Mesure de $V_{pv}$ (Tension des modules photovoltaïques) et $I_{pv}$ (Courant des modules photovoltaïques) de deux modules branchés en parallèle avec différentes charges électriques

D'abord on cite les conditions du test :

- Localisation : Frantz Fanon, Faculté de technologie, Boumerdès
- Date : 16/06/2022
- Heure : 13:30
- Inclinaison des modules :  $\sim 45^\circ$
- Orientation des modules : Sud-Ouest
- Température :  $31^\circ\text{C}$

Pour ce test on a branché deux modules photovoltaïques en parallèle à l'entrée du compteur et différentes charges électriques (batterie et des lampes de 21 Watts) à la sortie. Le tableau suivant montre les valeurs obtenues de  $V_{pv}$  :

	Batterie unique	Batterie et une seule lampe	Batterie et deux lampes	Batterie et trois lampes
$V_{pv}$ (V)	17.54	17.17	16.42	15.08

**Tableau 4.5 :** Valeurs de  $V_{pv}$  (Tension des modules photovoltaïques) de deux modules photovoltaïques branchés en parallèle avec différentes charges électriques

On remarque que  $V_{pv}$  diminue chaque fois qu'on ajoute une charge mais elle est un peu plus grande que  $V_{pv}$  du test précédent où on a utilisé un seul module photovoltaïque. La figure suivante montre la comparaison entre les deux :

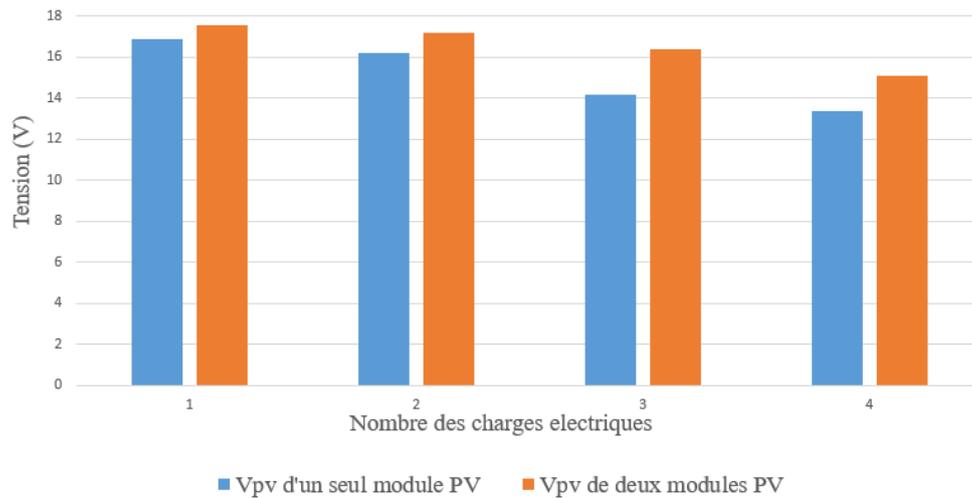


Figure 4.13 : Influence de la charge sur  $V_{pv}$

Ensuite on a mesuré  $I_{pv}$  :

	Batterie unique	Batterie et une seule lampe	Batterie et deux lampes	Batterie et trois lampes
$I_{pv}$ (A)	4.20	4.59	5.35	6.87

Tableau 4.6 : Valeurs de  $I_{pv}$  (Courant des modules photovoltaïques) de deux modules photovoltaïques branchés en parallèle avec différentes charges électriques

La figure suivante représente la comparaison entre  $I_{pv}$  d'un seul module et  $I_{pv}$  de deux modules photovoltaïques :

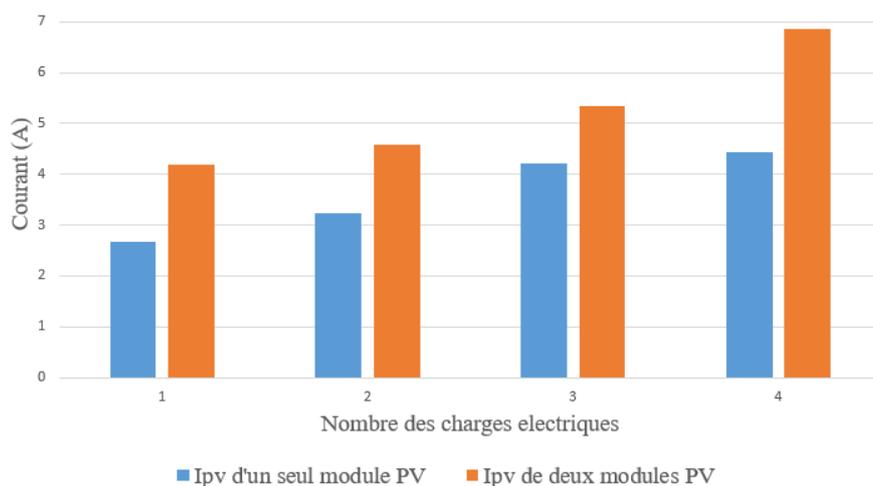


Figure 4.14 : Influence de la charge sur  $I_{pv}$

On remarque que  $I_{pv}$  des deux modules augmente après l'ajout de chaque charge, on remarque aussi qu'il est considérablement plus grand que  $I_{pv}$  d'un seul module photovoltaïque.

#### 4.4.4 Journal de Eminute pendant une heure

D'abord on cite les conditions du test :

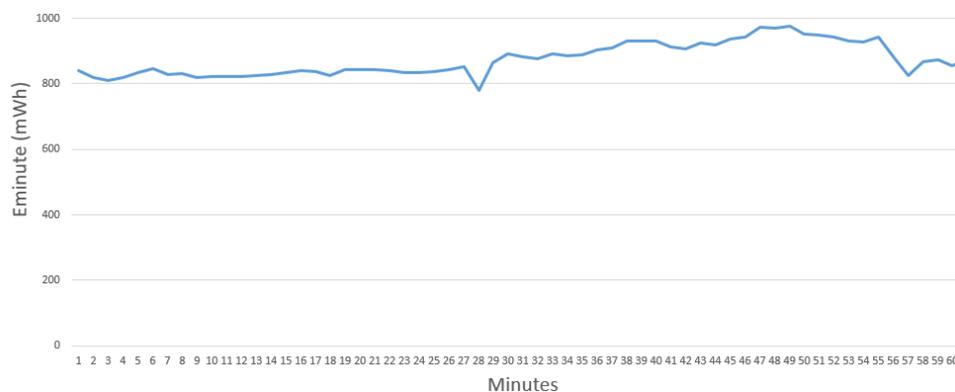
- Localisation : Frantz Fanon, Faculté de technologie, Boumerdès
- Date : 16/06/2022
- Heure : de 13:40 à 14:40
- Inclinaison du module :  $\sim 45^\circ$
- Orientation du module : Sud-Ouest
- Température :  $31^\circ\text{C}$

Pour faire ce journal on a laissé la batterie en charge pendant une heure à partir d'un seul module photovoltaïque, ensuite on a branché notre compteur à un ordinateur via câble USB afin de récupérer le fichier "log\_de\_Eminute.txt", voir la figure suivante :



**Figure 4.15 :** Branchement du compteur à un ordinateur pour récupérer le journal de Eminute pendant une heure

Ensuite on a copié ce journal dans Excel pour tracer le graphe de Eminute présenté dans la figure suivante :



**Figure 4.16 :** Graphe de Eminute pendant une heure obtenu à partir d'un seul module PV

On remarque que Eminute varie entre  $\sim 800$  mWh et  $\sim 1000$  mWh pendant cette heure. Donc on peut valider l'enregistrement du journal de Eminute sur le Raspberry pi pico.

### 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons effectué des mesures électriques pour déterminer l'influence du branchement en série ainsi que le branchement en parallèle des modules photovoltaïques sur la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et sur le courant en court-circuit ( $I_{cc}$ ). On a aussi montré l'influence de l'inclinaison et de l'orientation du module sur  $I_{cc}$ .

Ensuite on a branché notre compteur au système et appliqué un algorithme de correction qui a réduit considérablement l'erreur relative de mesure de  $I_{pv}$  par notre compteur. On a aussi montré l'effet d'ajout des charges électriques et d'un module photovoltaïque sur le courant  $I_{pv}$  et la tension  $V_{pv}$ .

Donc après ces tests on a assuré que le compteur fonctionne comme prévu et que les mesures de courant et de tension présentent une faible erreur relative ce qui offre une surveillance fiable de la conversion d'énergie.

## *Conclusion générale*

### **Conclusion générale**

Après l'installation d'un système photovoltaïque il est nécessaire de surveiller son performance pour valider son bon fonctionnement ce qui nécessite des prélèvements des données associées à la production d'énergie. Cette tâche peut être accomplie en utilisant un compteur intelligent qui compte l'énergie produite et enregistre automatiquement les données sur différents intervalles de temps sous forme de journaux.

En premier lieu, nous avons étudié les systèmes photovoltaïques autonomes constitués d'un générateur photovoltaïque, d'un régulateur de charge, d'une batterie et d'une charge électrique dont le but est d'intégrer un compteur intelligent.

En deuxième partie nous avons proposé une architecture hardware pour le compteur intelligent basée sur la carte Raspberry Pi Pico et qui utilise les données provenant du capteur de courant et de tension (INA219) pour calculer la puissance et compter l'énergie produite puis afficher les résultats sur un écran OLED. Elle permet aussi d'enregistrer des journaux de production d'énergie qui peuvent être récupérés en connectant la carte Pico à un ordinateur via câble USB.

Dans la troisième partie on a effectué des mesures électriques sur les modules photovoltaïques pour montrer l'influence de l'orientation et de l'inclinaison ainsi que le branchement série et le branchement parallèle sur la tension en circuit ouvert et le courant en court-circuit.

En quatrième partie nous avons validé le fonctionnement du compteur et réalisé des tests de précision qui ont montré la présence d'erreurs relatives proportionnelles aux courants mesurés, donc on a implémenté un algorithme de correction qui a considérablement diminué ces erreurs.

Enfin, on a validé l'enregistrement du journal d'énergie sur la mémoire du Raspberry Pi Pico en suivant le rechargement de la batterie du système photovoltaïque pendant une heure.

Les perspectives que nous envisageons sont :

- Utilisation du capteur de température intégré dans le Raspberry Pi Pico pour tenir en compte le changement de la température ambiante afin d'améliorer l'algorithme de correction de la mesure de courant.
- Ajout d'une unité de communication sans fil.
- Miniaturisation du circuit.

## *Bibliographie*

## Bibliographie

- [1] Xiaojing Sun, "Solar Technology Got Cheaper and Better in the 2010s. Now What?", 17 Décembre 2019, [en ligne], disponible sur : <https://www.greentechmedia.com/articles/read/solar-pv-has-become-cheaper-and-better-in-the-2010s-now-what> (Consulté le 24/06/2022)
- [2] Andrew Turgeon, Elizabeth Morse, Elizabeth Morse, "Sun", 2/06/2022, [en ligne], disponible sur : <https://education.nationalgeographic.org/resource/sun>, (consulté le 14/06/2022).
- [3] Cuong Hung Tran, "Améliorations d'une chaîne de conversion de l'énergie solaire en électricité autonome en vue d'application dans les pays en voie de développement", thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 22/01/2019.
- [4] Andrews J.W, "Evaluation of flat-plate photovoltaic/thermal hybrid systems for solar energy utilization", Department of Energy and Environment, Solar Technology Group (Brookhaven National Laboratory), 1981.
- [5] DRIR Nadia, "Modélisation et optimisation du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque par des techniques intelligentes", thèse de doctorat USTHB, 17/12/2014.
- [6] Energie facteur 4, "La cellule photovoltaïque", [en ligne], disponible sur : <https://www.ef4.be/fr/archives/energies-renouvelables/solaire-photovoltaïque/fonctionnement.html>, (consulté le 25/03/2022).
- [7] H.J. Hovel, "Semiconductors and Semimetals. In "Solar Cells"", Vol. 11, Academic Press (New York), 2001.
- [8] Annabac, "Le photovoltaïque pour capter l'énergie solaire", [en ligne], disponible sur : <https://www.annabac.com/revision-bac/le-photovoltaïque-pour-capter-l-energie-solaire>, (consulté le 13/04/2022).
- [9] Planète Energies, "La cellule photovoltaïque : comment ça marche ?", 02/04/2019, [en ligne], disponible sur : <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-cellule-photovoltaïque-comment-ca-marche>, (consulté le 13/04/2022).
- [10] Azeddine Houari, ResearchGate, "Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque", Décembre 2012, [en ligne], disponible sur : [https://www.researchgate.net/figure/Schema-electrique-equivalent-dune-cellule-photovoltaïque\\_fig9\\_324474604](https://www.researchgate.net/figure/Schema-electrique-equivalent-dune-cellule-photovoltaïque_fig9_324474604), (consulté le 13/04/2022).
- [11] Kaouane Mohamed, "Contribution à la commande d'un système de conversion hybride photovoltaïque-éolien avec stockage de l'énergie", Thèse de Doctorat USTHB, 28/05/2018.
- [12] Energie Plus, "Caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïques", 09/08/2010, [en ligne], disponible sur : <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaïque6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaïques/>, (consulté le 28/05/2022).

- [13] Energie Plus, "Rendement et puissance crête des cellules photovoltaïques", 09/08/2010, [en ligne], disponible sur : [https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/rendement-et-puissance-crete-des-cellules-photovoltaiques/#Influence\\_de\\_leclairement](https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/rendement-et-puissance-crete-des-cellules-photovoltaiques/#Influence_de_leclairement), (consulté le 30/05/2022).
- [14] Orygeen, "Module Photovoltaïque", [en ligne], disponible sur : <https://www.orygeen.eu/docs-actus/glossaire/module-photovoltaique/>, (consulté le 05/06/2022).
- [15] Batiproducts, "Panneau photovoltaïque compact à 48 cellules | PowerPlus 170-185 MC", 01/01/2009, [en ligne], disponible sur : <https://www.batiproducts.com/fiche/produits/panneau-photovoltaique-compact-a-48-cellules-p69116758.html>, (consulté le 16/06/2022).
- [16] IUTenligne, "Regroupement série ou parallèle de panneaux ou cellules", [en ligne], disponible sur : [https://public.iutenligne.net/etudes-et-realisations/sivert/panneaux-photovoltaiques/8\\_regroupement\\_srie\\_ou\\_parallle\\_de\\_panneaux\\_ou\\_cellules.html](https://public.iutenligne.net/etudes-et-realisations/sivert/panneaux-photovoltaiques/8_regroupement_srie_ou_parallle_de_panneaux_ou_cellules.html), (consulté le 17/06/2022).
- [17] ENGIE My Power, "Installation de panneau solaire : 8 schémas pour tout expliquer", 15/10/2021, [en ligne], disponible sur : <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/schema-panneau-photovoltaique.html>, (consulté le 13/04/2022).
- [18] Solaire sans frontières, "Systèmes photovoltaïques autonomes", 2019, [en ligne], disponible sur : <https://www.ssf-asso.org/systemes-pv-autonomes/>, (consulte le 05/06/2022).
- [19] Civilsol.Fr, "Câblage de la mise à la terre d'une installation solaire photovoltaïque", [en ligne], disponible sur : <https://www.civilsol.fr/info/50-cablage-de-la-mise-a-la-terre-d-une-installation-solaire-photovoltaique>, (consulté le 15/06/2022).
- [20] Batiproducts, "Parafoudre pour installations photovoltaïques jusqu'à 1 200 volts | Dehnguard M YPV SCI" , 01/01/2011, [en ligne], disponible sur : <https://www.batiproducts.com/fiche/produits/parafoudre-pour-installations-photovoltaiques-jus-p69104128.html>, (consulté le 15/06/2022).
- [21] Wikipédia, "Parafoudre", dernière modification le 30 mars 2022 à 17:02, [en ligne], disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Parafoudre>, (consulté le 15/06/2022).
- [22] Larousse, "Paratonnerre", [en ligne], disponible sur : <https://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Paratonnerre/1003331>, (consulté le 15/06/2022).
- [23] Science & Society Picture Library (SSPL), "Edison electrolyte meter", [en ligne], Disponible sur: <https://www.ssplprints.com/image/82666/edison-electrolyte-meter-c-1881> , (Consulté le 13/04/2022).
- [24] The Henryford organisation, "Westinghouse Shallenberger Ampere-hour Meter", [en ligne], Disponible sur : <https://www.thehenryford.org/collections-and-research/digital-collections/artifact/64863/#slide=gs-366593> , (Consulté le 13/04/2022).

- [25] DEREK RYAN STRONG, PhD thesis, "The Early Diffusion of Smart Meters in the US Electric Power Industry", University of North Carolina at Greensboro (United States), p 28-32, 2017.
- [26] Facilities engineering branch - Denver office - United States, "watt-hour meter maintenance and testing", vol. 3-10, p. 4-6, December 2000.
- [27] Govindarajan Ramalingam, S. Meikandasivam and D. Vijayakumar, "A Market Research on Current Energy Metering System and Future Opportunities". International Journal of Management Sciences and Business Research, Vol. 9, p. 68, Mars 2020.
- [28] Theodoros G. Paraskevakos & W. Thomas Bushman, (1979), "Apparatus and method for remote sensor monitoring, metering and control", United States Patent (Ser. No. 4,241,237), U.S. Patent and Trademark Office.
- [29] Itron, "Linky", [en ligne], Disponible sur: <https://www.itron.com/fr/solutions/product-catalog/linky>, (Consulté le 15/04/2022).
- [30] D. P. Chandima, K. S. K. Weranga and Sisil Kumarawadu. "Smart Metering Design and Applications", Springer, 2013.
- [31] Hélène HORSIN MOLINARO & Eric VOURC'H, "Capteurs pour la mesure de courant", Cours de sciences de l'ingénieur Université de Paris-Saclay, Edité le 22/01/2016.
- [32] Yhang Zhen, "Current Sensing Concept and Fundamentals", Microchip Technology Inc., 2010-2011.
- [33] GE Publication No. GET-8402, "CT Application Guide for the 489 Generator Management Relay", GE Power Management Technical Notes.
- [34] Edward Ramsden, "Hall-effect sensors – Theory and applications", Elsevier Science & Technology Books, second edition, p. 272, 2006.
- [35] S.K. MUNDIBI "Codage et transmission des données dans un réseau", Université de Lubumbashi RDC, 2008.
- [36] Anton A. Huurdeman, "The Worldwide History of Telecommunications", John Wiley & Sons, p. 529, 2003.
- [37] IEEE, "IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", in IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012), 2016.
- [38] Russel Kay, "Mesh Networks", 2009, [en ligne], disponible sur : <http://www.computerworld.com/article/2550305/mobile-wireless/meshnetworks.html>, (Consulté le 15/04/2022)
- [39] H. G. Schroder Filho, J. Pissolato Filho and V. L. Moreli, "The adequacy of LoRaWAN on smart grids: A comparison with RF mesh technology", 2016 IEEE International Smart Cities Conference, 2016.

- [40] B. Lichtensteiger, B. Bjelajac, C. Müller and C. Wietfeld, "RF Mesh Systems for Smart Metering: System Architecture and Performance ", 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications, p. 379-384, 2010.
- [41] Biteshnath Tiwari & Chandra Mouli Upadhyay & anket Agarwal & Sreekesh Udupa "Wireless Communication Technologies for Smart Metering-Opportunities and Challenges", International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 7, 2018.
- [42] Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL), "Pack de conformité : les compteurs communicants", 2014. Disponible en ligne sur : [https://www.cnil.fr/sites/default/files/typo/document/Pack\\_de\\_Conformite\\_COMPTEURS\\_COMMUNICANTS.pdf](https://www.cnil.fr/sites/default/files/typo/document/Pack_de_Conformite_COMPTEURS_COMMUNICANTS.pdf) , (consulte le 16/04/2022).
- [43] Gabino Jiménez-Castillo, Francisco José, Muñoz-Rodríguez, Catalina Rus-Casas and Pedro Gómez-Vidal, "Improvements in Performance Analysis of Photovoltaic Systems: Array Power Monitoring in Pulse Width Modulation Charge Controllers", Sensors by MDPI, 2019.
- [44] Raspberry Pi foundation, "Raspberry Pi Pico Pinout", [en ligne], Disponible sur: <https://datasheets.raspberrypi.com/pico/Pico-R3-A4-Pinout.pdf>, (Consulté le 25/04/2022).
- [45] Kitronik, "Storing Data - Discovery Kit For Raspberry Pi Pico Extension Exp 2", [en ligne], Disponible sur : <https://kitronik.co.uk/blogs/resources/raspberry-pi-pico-discovery-kit-extension-exp-2-storing-data>, (Consulté le 07/05/2022).
- [46] Aivar Annamaa, "Introducing Thonny, a Python IDE for Learning Programming", 15th Koli Calling Conference on Computing Education Research, 2015.
- [47] Simon Long, "A Raspbian desktop update with some new programming tools", 2017, [en ligne], disponible sur : <https://www.raspberrypi.com/news/a-raspbian-desktop-update-with-some-new-programming-tools/> , (Consulté le: 28/04/2022).
- [48] Patrick Weßkamp & Joachim Melbert, "High Performance Current Measurement with Low-Cost Shunts by means of Dynamic Error Correction", GMA/ITG conference on sensors and measuring systems, 2016.

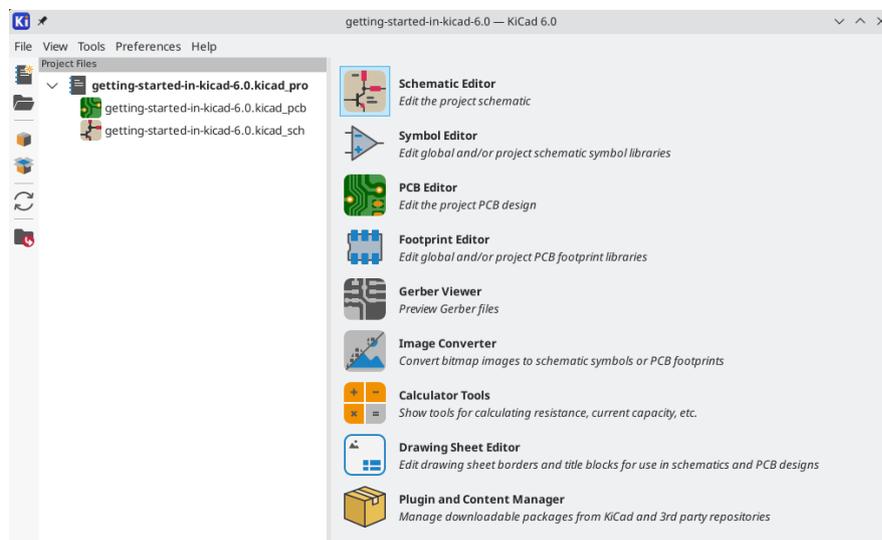
# *Annexes*

## Annexe A : KiCad

KiCad est une suite gratuite et open-source d'automatisation de la conception électronique. Il comprend la capture schématique, la simulation de circuit intégré, la conception du circuit imprimé (PCB), le rendu 3D et le traçage/l'exportation de données vers de nombreux formats. KiCad comprend également une bibliothèque de composants comprenant des milliers de symboles, d'empreintes et de modèles 3D. Il a une configuration système minimale et fonctionne sous Linux, Windows et macOS.

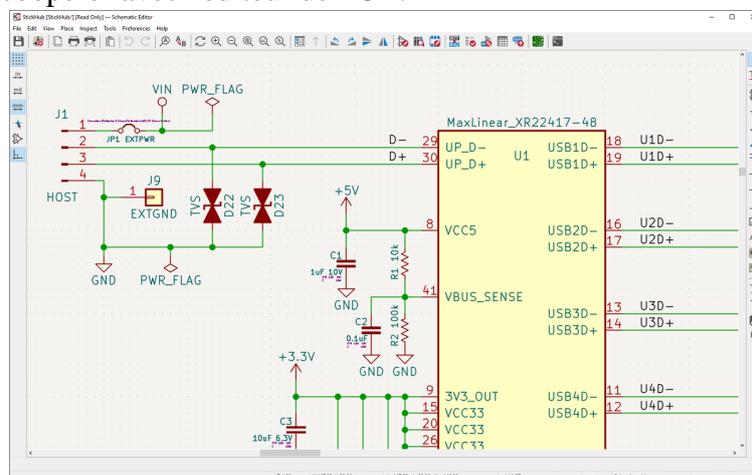


La première chose à faire lors du démarrage d'un nouveau design est de créer un nouveau projet. L'ouverture de KiCad fera apparaître la fenêtre de projet. On clique sur Fichier → Nouveau projet, on accède à l'emplacement souhaité et on donne un nom à notre projet.



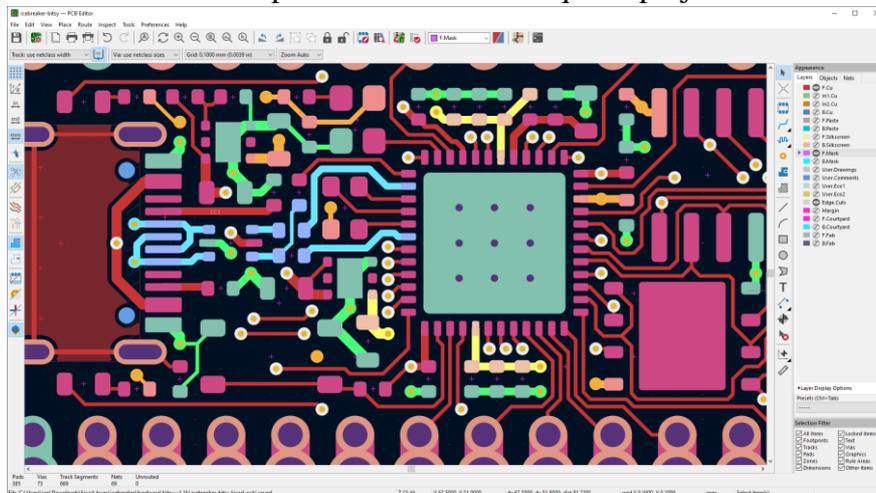
Kicad a plusieurs sous logiciels tell que :

- Editeur de schéma (Schematic editor) : comprend un éditeur de bibliothèque de symboles, qui peut créer et modifier des symboles et gérer des bibliothèques. Il est destiné à coopérer avec l'éditeur de PCB.

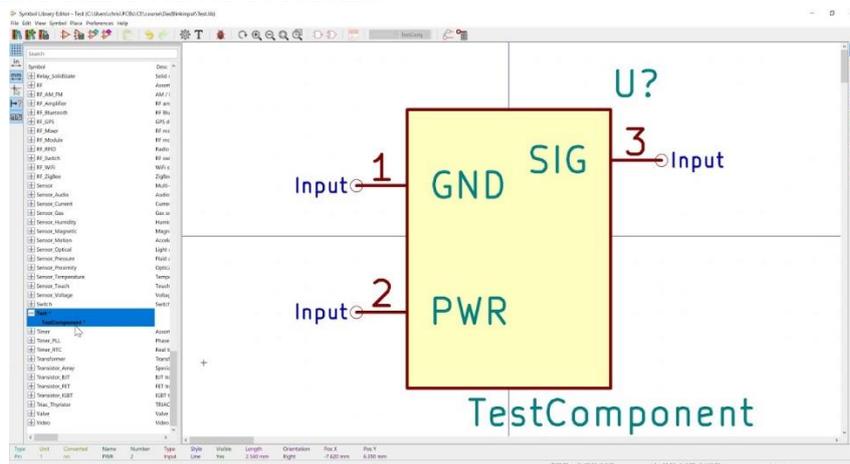


## Annexe A : KiCad

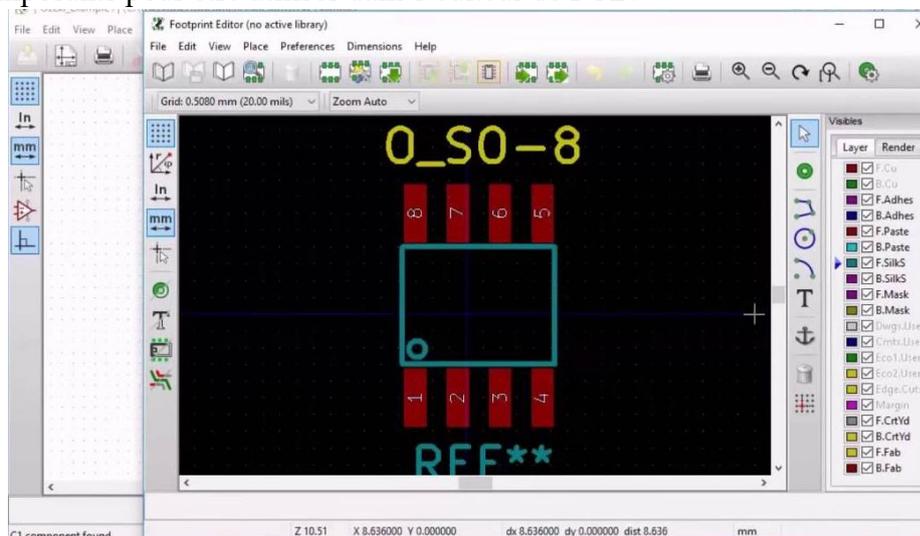
- Editeur de PCB (PCB editor) : sert à concevoir une carte PCB à partir d'un schéma créé par l'éditeur de schéma. Lorsque on crée un nouveau projet, KiCad génère un fichier de carte PCB vide portant le même nom que le projet.



- Editeur des symboles (Symbol editor) : sert à créer et/ou modifier des symboles pour être utilisés dans l'éditeur de schéma.



- Editeur des empreintes (Footprint editor) : sert à créer et/ou modifier des empreintes des composants pour être utilisés dans l'éditeur de PCB.



## Annexe B : Programme du compteur

---

```
1. from machine import Pin, I2C, ADC
2. import utime
3. from file_handling import FILE
4. from ina219 import INA219
5. import sh1106
6. import math
7. import os
8.
9. # initialisation des pins
10. BP1 = Pin(7, Pin.IN, Pin.PULL_DOWN)
11.
12. batterie_rouge = Pin(15, Pin.OUT)
13. batterie_verte = Pin(14, Pin.OUT)
14.
15. ADC_Batterie = ADC(26)
16.
17. # initialisation des variables
18. coff_de_tension = 1.37
19. coff_de_courant = 1.51
20. coff_de_Vbatterie = 9.69
21.
22. E = 0.0 # énergie totale
23. Emin_en_cours = 0.0 # énergie de minute en cours de calcul
24. Emin = 0.0 # énergie de la minute précédente
25. Eheure_en_cours = 0.0 # énergie de l'heure en cours de calcul
26. Eheure = 0.0 # énergie de l'heure précédente
27. Ejour_en_cours = 0.0 # énergie du jour en cours de calcul
28. Ejour = 0.0 # énergie du jour précédent
29. Emois_en_cours = 0.0 # énergie du mois en cours de calcul
30. Emois = 0.0 # énergie du mois précédent
31. Secondes = 0 # pour compter les seconds
32.
33. compteur_BP1 = 0 # s'incrémente si BP1 est poussé
34. compteur_BP2 = 0 # s'incrémente si BP2 est poussé
35.
36. # initialisation de d'enregistrement des données
37. file = FILE()
38. Max_File_Size = 1000
39. def enregistrer_en_log(variable, LogFileName):
40.     global Max_File_Size, file
41.     while(file.CheckFileSize(LogFileName) > Max_File_Size):
42.         file.RemoveOneLine(LogFileName)
43.         variable_string = str("%.2f" % variable) + "\r\n"
44.         stringToWrite = (variable_string)
45.         file.WriteFile(LogFileName, stringToWrite)
46.         utime.sleep_ms(100)
47.
48. # initialisation de l'afficheur oled
49. i2c = I2C(0, scl=Pin(1), sda=Pin(0), freq=200000)
50.
51. display = sh1106.SH1106_I2C(128, 64, i2c, Pin(16), 0x3c)
52. display.sleep(False)
53.
54.
55. # initialisation de ina219
56. SHUNT_OHMS = 0.009
57. max_expected_amps = 10
58. ina = INA219(SHUNT_OHMS, I2C(0), max_expected_amps)
```

## Annexe B : Programme du compteur

---

```
59. ina.configure(1, 3)
60. utime.sleep_ms(10)
61.
62. # déclaration des fonctions
63. def solveCubic(Iina):
64.     resolution = 0.005
65.     Iina_corrected = 0
66.     while (0.0009 * Iina_corrected**3 + 1.06 * Iina_corrected - Iina) < 0 :
67.         Iina_corrected += resolution
68.
69.     return Iina_corrected
70.
71. def CompterEnergie():
72.     global Secondes, Emin, Emin_en_cours, Eheure, Eheure_en_cours, Ejour,
       Ejour_en_cours, Emois, Emois_en_cours
73.
74.     if Secondes % 60 == 0 : # 60 secondes = une minute
75.         Emin = Emin_en_cours
76.         Emin_en_cours = 0
77.         Eheure_en_cours += Emin
78.         enregistrer_en_log(Emin, "log_de_Eminute.txt")
79.
80.     if Secondes % 3600 == 0: # 3600 secondes = une heure
81.         Eheure = Eheure_en_cours
82.         Eheure_en_cours = 0
83.         Ejour_en_cours += Eheure
84.         enregistrer_en_log(Eheure, "log_de_Eheure.txt")
85.
86.     if Secondes % 86400 == 0: # 86400 secondes = un jour
87.         Ejour = Ejour_en_cours
88.         Ejour_en_cours = 0
89.         Emois_en_cours += Ejour
90.         enregistrer_en_log(Ejour, "log_de_Ejour.txt")
91.
92.     if Secondes % 2592000 == 0: # 2592000 seconde = un mois
93.         Emois = Emois_en_cours
94.         Emois_en_cours = 0
95.         enregistrer_en_log(Emois, "log_de_Emois.txt")
96.
97. def IncrementerCompteurBP1():
98.     # sert à incrémenter commpteur_BP1 si BP1 est poussé
99.     global compteur_BP1
100.    if BP1.value() :
101.        if compteur_BP1 == 2:
102.            compteur_BP1 = 0
103.        else:
104.            compteur_BP1 += 1
105.
106. def AfficherPVI():
107.     # sert à afficher la puissance, le voltage ou le courant selon la valeur
       de compteur_BP1
108.     global P, V, I
109.
110.
111.     if I < 1 :
112.         I = I * 1000
113.         unite_de_courant = "mA"
114.     else :
115.         unite_de_courant = "A"
```

## Annexe B : Programme du compteur

---

```
116.
117.     display.text("V : " + "%.2f" % V + "V", 0, 0)
118.     display.text("I : " + "%.2f" % I + unite_de_courant, 0, 10)
119.     display.text("P : " + "%.2f" % P + "W", 0, 20)
120.
121. def AfficherEnergie():
122.     # sert à afficher E, Emin, Eheure, Ejour, Eemaine ou Emois selon la
    valeur de compteur_BP2
123.     global E, Emin, Eheure, Ejour, Emois, compteur_BP1
124.     if compteur_BP1 == 1:
125.         info = "Ehour: "
126.         energie = Eheure
127.     elif compteur_BP1 == 2:
128.         info = "Emon : "
129.         energie = Emois
130.     else:
131.         info = "Emin : "
132.         energie = Emin
133.
134.     if energie < 1000:
135.         unite = "mWh"
136.     elif energie < 1000000:
137.         energie = energie / 1000
138.         unite = "Wh"
139.     else:
140.         energie = energie / 1000000
141.         unite = "kWh"
142.     display.text(info + "%.2f" % energie + unite, 0, 50)
143.
144.     energie = Ejour
145.     info = "Eday : "
146.     if energie < 1000:
147.         unite = "mWh"
148.     elif energie < 1000000:
149.         energie = energie / 1000
150.         unite = "Wh"
151.     else:
152.         energie = energie / 1000000
153.         unite = "kWh"
154.     display.text(info + "%.2f" % energie + unite, 0, 30)
155.
156.     energie = E
157.     info = "Etot : "
158.     if energie < 1000:
159.         unite = "mWh"
160.     elif energie < 1000000:
161.         energie = energie / 1000
162.         unite = "Wh"
163.     else:
164.         energie = energie / 1000000
165.         unite = "kWh"
166.     display.text(info + "%.2f" % energie + unite, 0, 40)
167.
168. def Afficher():
169.     display.fill(0) # effacer l'afficheur
170.     AfficherPVI()
171.     AfficherEnergie()
172.     display.show() # afficher les textes donnés
173.
```

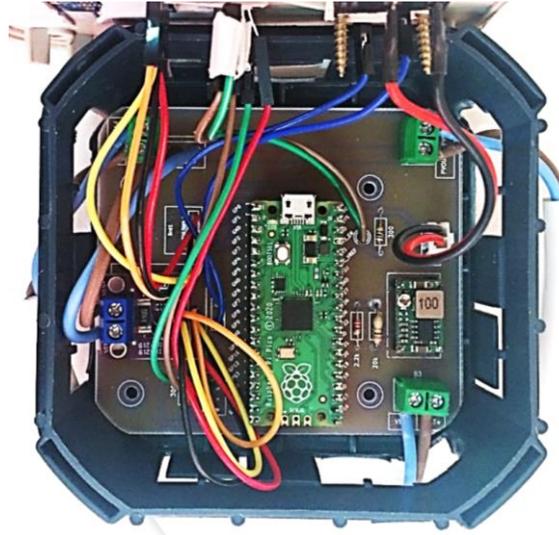
## Annexe B : Programme du compteur

---

```
174.while True:
175.    t1 = utime.ticks_ms()
176.
177.    # lecture des tensions Vbatterie et Vpv + conversion
178.    Vbatterie = 0
179.    for i in range (50) :
180.        Vbatterie += (coff_de_Vbatterie * (ADC_Batterie.read_u16() * 3.3) /
181.        65535)/50
182.        utime.sleep_ms(1)
183.
184.    # allumer la LED RGB en rouge si la batterie est faible et en vert si
185.    # elle n'est pas.
186.    if Vbatterie <= 12.2 :
187.        batterie_rouge.value(0)
188.        batterie_verte.value(1)
189.    elif Vbatterie > 12.2 :
190.        batterie_verte.value(0)
191.        batterie_rouge.value(1)
192.
193.    # lecture de tension et courant
194.    V = coff_de_tension * ina.voltage()
195.    utime.sleep_ms(10)
196.    if V < 2 : V = 0
197.
198.    I = coff_de_courant * ina.current() / 1000
199.    utime.sleep_ms(10)
200.    if I < 0.005 :
201.        I = 0
202.    else :
203.        I = solveCubic(I)
204.
205.    P = V * I
206.
207.    E += P / 3.6
208.    Emin_en_cours += P / 3.6
209.
210.    Secondes += 1
211.
212.    CompteurEnergie()
213.    IncrementerCompteurBP1() # incrémenter compteur_BP1 si BP1 est poussé
214.    Afficher()
215.
216.    T = 0
217.    while T < 1000 :
218.        t2 = utime.ticks_ms()
219.        T = t2 - t1
```

## Annexe C : Photos supplémentaires de notre travail

---



Intérieur du boîtier du compteur



Branchement du compteur au système photovoltaïque autonome (module photovoltaïque inclus)