

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE

Département de Génie Electrique et Electronique (GEE)



## **PROJET DE FIN D'ETUDES**

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

**En : Electronique**

**Spécialité : Instrumentation**

**Par : GOURARI Mohamed Jaoued & BEKKAY Youcef**

**Intitulé du Sujet**

**Étude et réalisation d'un contrôleur de charge solaire MPPT  
en utilisant la carte Arduino**

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

<b>Mr. LACHACHI Djamal</b>	<b>MCB</b>	Université de Tlemcen	Président
<b>Mr. MASSOUM Nour-eddine</b>	<b>MCB</b>	Université de Tlemcen	Examineur
<b>Mr. BOUANATI Sidi Mohammed</b>	<b>MAA</b>	Université de Tlemcen	Encadrant

Année universitaire : 2021 /2022



# *Remerciements*

*Avant tout, nous remercions le bon Dieu tout puissant qui nous donne de la foi, du courage et de patience durant toutes nos années d'étude. Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'elles ont consentis afin que nous puissions terminer nos études.*

*Nous remercions cordialement Monsieur **Bouanati Sidi Mohammed** pour nous avoir encadrés, qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.*

*De même, nous remercions Monsieur **Lachachi Djamal** qui nous a fait l'honneur de présider le jury pour la soutenance de notre PFE.*

*Nous remercions également Monsieur **Massoum Nour-eddine** l'examineur, qui a eu l'honneur d'accepter nos sympathies pour siéger dans notre jury.*

*Nous remercions tous les professeurs qui nous ont enseigné depuis le premier jour d'école*

## Liste des abréviations

**PV:** Photovoltaïque.

**MPPT:** Maximum Power Point Tracker.

**AC:** Courant Alternatif (Alternative Current).

**DC:** Courant Continu (Direct Current)

**CC :** Courant Continu.

**DC-DC :** Continue/Continue

**GPV:** Générateur Photovoltaïque

**FF:** Facteur de forme.

**F.é.m. :** Force Électromotrice

**PPM:** Le point de puissance maximum.

**PWM:** Pulse Width Modulation

**PWMH:** High Pulse Width Modulation

**PWML:** Low Pulse Width Modulation

**P&O:** Perturbation ET Observation

**INC :** Incrémental Conductance

**FLC :** contrôleur logique flou

**MOSFET:** Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

**RX :** Ordonnance ou Traitement.

**TX :** Emission ou Transmission.

**GND:** Ground.

**ISIS:** Intelligent Schematic Input System.

## *Table des matières*

Introduction générale.....	11
Chapitre I Généralités sur les systèmes photovoltaïques .....	13
I.1 Introduction.....	14
I.2 Énergie solaire photovoltaïque .....	14
I.3 Un système photovoltaïque .....	15
I.3.1 la composition d'un système photovoltaïque.....	15
• Systèmes autonomes .....	16
I.3.2 La conversion de la lumière en électricité .....	19
• Jonction P-N :.....	22
I.3.3 Caractéristiques électriques.....	24
I.4 Puissance et rendement .....	27
I.4.2 Facteur de forme.....	27
I.4.3 Rendement.....	28
I.5 Technologie des cellules solaires.....	29
I.5.1 Les cellules en silicium cristallin .....	29
I.5.2 Les cellules solaires à couches minces.....	30
I.5.3 Cellules solaires de troisième génération.....	30
I.6 Regroupement des cellules .....	31
I.6.1 Connexion en série des modules .....	31
I.6.2 Connexion des modules en parallèle .....	32
I.6.3 Connexion des modules série-parallèle (Combinaison mixte).....	32
I.7 Contrôleur de charge solaire .....	34
I.7.1 Contrôleurs de charge solaire PWM.....	34
I.7.2 Contrôleurs de charge solaire MPPT : .....	34
I.7.3 Différence entre PWM et MPPT .....	35
I.7.4 Les types des convertisseur DC-DC .....	36
I.7.4 Présentation de quelques types de convertisseurs DC-DC .....	37
I.8 Le choix de batterie dans le système PV.....	45
I.8.1 Principes de base des chargeurs de batterie.....	46
I.8.2 Cycle de charge en trois étapes.....	46
I.9 Description du système PV basé sur le MPPT pour l'application DC-DC.....	48
I.9.1 Contrôleur MPPT basé sur le courant ou la tension :.....	48
I.9.2 Système MPPT basé sur le contrôle du cycle de service .....	49
I.9.3 Aperçu sur les différentes techniques de MPPT.....	50
I.9.3.2 Conductance incrémentale (INC).....	53

Cycle de service direct INC .....	56
I.10 Conclusion .....	57
Chapitre II .....	58
Description des différents composants utilisés pour la réalisation du projet .....	58
II.1 Introduction .....	59
II .2 Les composants électroniques utilisés .....	59
II.3 La carte Arduino .....	59
II. 3.2 Aperçu sur la carte Arduino UNO .....	60
II.3.3 Caractéristiques de l'Arduino UNO .....	60
II.3.4 Microcontrôleur .....	61
II. 3.5 Configuration du brochage de l'Arduino UNO.....	61
II. 3.5 Alimentation de l'Arduino.....	63
II.3.6 L'environnement de la programmation (Arduino IDE).....	63
II.4. Le module INA169 .....	64
II.4.1 Principe de fonctionnement du capteur INA169.....	65
II.4.2 Câblage du module INA169 avec Arduino UNO .....	65
II.5 Écran LCD I2C 20X4.....	66
II.5.1 Présentation du matériel de l'écran LCD I2C.....	66
II.5.2 Câblage d'Arduino UNO avec l'écran LCD I2C .....	67
II.6 Le transistor IRFP250N .....	68
II.7 IR2104 .....	68
II.7.1 Caractéristiques.....	69
II.7.2 Principe de fonctionnement de l'IR 2104.....	69
II.8. Conclusion.....	70
Chapitre III.....	71
Simulation et réalisation .....	71
du circuit .....	71
III.1 Introduction .....	72
III.2 La partie Simulation.....	72
III.2.1 Présentation du logiciel PROTEUS .....	72
III.2.2 Présentation du module ISIS .....	73
III.2.3 Modèle Proteus de panneau PV .....	73
III.2.4 Schéma général de notre prototype .....	74
III.3 Schémas et méthodologie suivie.....	74
III.3.1 Description du prototype .....	74
III.3.2 Le fonctionnement de programme.....	81
III.4 La partie réalisation .....	87

III.4.1 Les étapes de fonctionnement de notre circuit.....	88
III.5 Conclusion .....	94
Conclusion générale .....	95
Références bibliographiques .....	96
Résumé.....	99

## *Liste des figures*

<i>Figure I. 1 Conversion de l'énergie solaire.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure I. 2 Fonctions principales d'un système photovoltaïque .....</i>	<i>15</i>
<i>Figure I. 3 Les principaux types de système PV. ....</i>	<i>16</i>
<i>Figure I. 4 Systèmes PV autonomes à courant alternatif .....</i>	<i>17</i>
<i>Figure I. 5 Système PV hybride .....</i>	<i>17</i>
<i>Figure I. 6 Système PV interactif de service public .....</i>	<i>18</i>
<i>Figure I. 7 système PV bimodal .....</i>	<i>18</i>
<i>Figure I. 8 Illustration schématique des bandes interdites dans divers matériaux. L'axe vertical représente l'énergie des électrons, et EF la position du niveau de Fermi .....</i>	<i>19</i>
<i>Figure I. 9 La prédiction du rendement maximal d'une cellule solaire en fonction de la bande interdite du matériau .....</i>	<i>22</i>
<i>Figure I. 10 a} Silicium pur {intrinsèque}. b} Silicium de type n. c} Silicium de type p [3]23</i>	
<i>Figure I. 11 Une jonction p-n en équilibre thermique avec une tension de polarisation nulle appliquée .....</i>	<i>23</i>
<i>Figure I. 12 Caractéristique courant tension d'une diode au silicium .....</i>	<i>25</i>
<i>Figure I. 13 Schéma équivalent d'une cellule solaire .....</i>	<i>26</i>
<i>Figure I. 14 Puissance maximale sur une caractéristique .....</i>	<i>27</i>
<i>Figure I. 15 Influence de l'éclairement .....</i>	<i>28</i>
<i>Figure I. 16 Structure d'une cellule photovoltaïque au silicium .....</i>	<i>29</i>
<i>Figure I. 17 Cellules solaires en silicium.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure I. 18 Connexion en série des modules.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure I. 19 Connexion en parallèle des modules .....</i>	<i>32</i>
<i>Figure I. 20 Connexion en parallèle des modules en série et en parallèle.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure I. 21 Contrôleurs de charge solaire PWM .....</i>	<i>34</i>

<i>Figure I. 22</i>	<i>Contrôleurs de charge solaire MPPT</i>	35
<i>Figure I. 23</i>	<i>Point de puissance maximale</i>	35
<i>Figure I. 24</i>	<i>PWM et MPPT</i>	36
<i>Figure I. 25</i>	<i>convertisseurs DC-DC</i>	37
<i>Figure I. 26</i>	<i>Convertisseur élévateur (Boost)</i>	38
<i>Figure I. 27</i>	<i>Convertisseur Boost durant l'état ON</i>	39
<i>Figure I. 28</i>	<i>Convertisseur Boost durant l'état OFF</i>	39
<i>Figure I. 29</i>	<i>Circuit de base du convertisseur buck</i>	40
<i>Figure I. 30</i>	<i>le Schémas équivalents du hacheur abaisseur (S fermé)</i>	41
<i>Figure I. 31</i>	<i>Schémas équivalents du convertisseur buck (S ouvert)</i>	41
<i>Figure I. 32</i>	<i>Convertisseurs Buck et Boost combines</i>	42
<i>Figure I. 33</i>	<i>Fonctionnement comme un convertisseur Buck pendant la période d'activation de Tr1.</i>	43
<i>Figure I. 34</i>	<i>Fonctionnement comme un convertisseur buck pendant la période d'arrêt de Tr1</i>	43
<i>Figure I. 35</i>	<i>Fonctionnement comme un convertisseur Boost pendant la période d'activation de Tr2.</i>	44
<i>Figure I. 36</i>	<i>Fonctionnement comme un convertisseur Boost pendant la période "off" de Tr2.</i>	45
<i>Figure I. 37</i>	<i>Option de choix de batterie.</i>	46
<i>Figure I. 38</i>	<i>Schéma de charge en trois étapes pour les batteries plomb-acide scellées</i>	48
<i>Figure I. 39</i>	<i>Contrôleur MPPT basé sur le courant ou la tension</i>	49
<i>Figure I. 40</i>	<i>Un système MPPT typique basé sur le cycle de service direct</i>	49
<i>Figure I. 41</i>	<i>Organigramme de la méthode conventionnelle Perturb and Observe (P&amp;O).</i>	51
<i>Figure I. 42</i>	<i>Le mouvement du point de fonctionnement dans l'opération de suivi MPP. (a) Pour une perturbation importante. (b) Pour une petite perturbation</i>	52
<i>Figure I. 43</i>	<i>Caractéristiques P-V pour la base de la méthode.</i>	54
<i>Figure I. 44</i>	<i>: L'organigramme de base de la méthode INC basée sur la tension.</i>	54
<i>Figure I. 45</i>	<i>La caractéristique P-I pour la méthode INC basée sur le courant</i>	55
<i>Figure I. 46</i>	<i>Organigramme de base de l'approche directe du cycle de service basée sur l'INC</i>	56
<i>Figure II. 1</i>	<i>Les différentes cartes Arduino.</i>	59
<i>Figure II. 2</i>	<i>Description de la Carte Arduino UNO</i>	60

<i>Figure II. 3 Microcontrôleur ATmega 328.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure II. 4 Broches d'E/S numériques de l'Arduino UNO.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure II. 5 Broches d'Entrées/Sorties analogiques de l'Arduino.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure II. 6 Structure générale de l'Arduino IDE.....</i>	<i>64</i>
<i>Figure II. 7 Capteur INA169.....</i>	<i>64</i>
<i>Figure II. 8 Schéma du circuit de capteur INA169 .....</i>	<i>65</i>
<i>Figure II. 9 branchements d'Arduino avec INA169.....</i>	<i>65</i>
<i>Figure II. 1 Structure d'un écran LCD-(20*4) avec I2C.....</i>	<i>66</i>
<i>Figure II. 11 Afficheur LCD 20x4. ....</i>	<i>67</i>
<i>Figure II. 12 Convertisseur i2c.....</i>	<i>67</i>
<i>Figure II. 13 IRFP250N .....</i>	<i>68</i>
<i>Figure II. 14 Driver IR2104.....</i>	<i>68</i>
<i>Figure II. 15 Schéma du circuit de Driver IR2104.....</i>	<i>70</i>
<i>Figure III. 1 Les différents blocs qui consiste notre prototype. ....</i>	<i>72</i>
<i>Figure III. 2 Modèle d'un panneau solaire sous ISIS. ....</i>	<i>73</i>
<i>Figure III. 3 Caractéristiques électriques du module (a : puissance =f (courant), b :le courant en fonction de la tension).....</i>	<i>73</i>
<i>Figure III. 4 Schéma général sous Proteus- ISIS .....</i>	<i>74</i>
<i>Figure III. 5 Les 4 parties qui consiste notre étude.....</i>	<i>75</i>
<i>Figure III. 6 Capteur de tension.....</i>	<i>76</i>
<i>Figure III. 7 Capteur de courant.....</i>	<i>77</i>
<i>Figure III. 8 Bloc de traitement (L'Arduino avec le pilote IR2104 .....</i>	<i>78</i>
<i>Figure III. 9 L'organigramme du programme principal .....</i>	<i>78</i>
<i>Figure III. 10 Convertisseur abaisseur de notre prototype sous ISIS.....</i>	<i>79</i>
<i>Figure III. 11 Le bloc d'affichage.....</i>	<i>80</i>
<i>Figure III. 12 Organigramme générale du chargeur de batterie.....</i>	<i>81</i>
<i>Figure III. 13 Visualisation de signal PWM et la tension de batterie dans l'état «Off».....</i>	<i>83</i>
<i>Figure III. 14 L'affichage dans l'état «Off».....</i>	<i>83</i>
<i>Figure III. 15 Visualisation de signal PWM et la tension de batterie dans l'état «On» .....</i>	<i>84</i>
<i>Figure III. 16 L'affichage dans l'état «On» .....</i>	<i>84</i>
<i>Figure III. 17 Visualisation de signal PWM et la tension de batterie dans l'état «Bulk» ...</i>	<i>85</i>
<i>Figure III. 18 L'affichage dans l'état «Bulk» .....</i>	<i>85</i>
<i>Figure III. 19 Visualisation de signal PWM et la tension de batterie dans l'état «Float» ..</i>	<i>86</i>

<i>Figure III. 20 L'affichage dans l'état «Float» .....</i>	<i>86</i>
<i>Figure III. 21 Schéma général de contrôleur de charge solaire MPPT.....</i>	<i>87</i>
<i>Figure III. 22 Les différents blocs dans notre réalisation.....</i>	<i>88</i>
<i>Figure III. 23 Visualisation de résultat de réalisation durant le mode 'OFF'.....</i>	<i>89</i>
<i>Figure III. 24 Visualisation du signal PWM dans le mode 'OFF' .....</i>	<i>89</i>
<i>Figure III. 25 Visualisation du signal PWM dans le mode 'ON'.....</i>	<i>90</i>
<i>Figure III. 26 Visualisation de LCD dans le mode 'ON'.....</i>	<i>90</i>
<i>Figure III. 27 Visualisation du signal PWM dans le mode 'BULK'.....</i>	<i>91</i>
<i>Figure III. 28 Visualisation de LCD dans le mode 'BULK'.....</i>	<i>91</i>
<i>Figure III. 29 Visualisation du signal PWM dans le mode 'FLOAT' .....</i>	<i>92</i>
<i>Figure III. 30 Visualisation de LCD dans le mode 'FLOAT' .....</i>	<i>92</i>
<i>Figure III. 31 vue globale du prototype réalisé.....</i>	<i>93</i>
<i>Figure III. 32 Prototype de contrôleur de charge solaire MPPT dans son boîtier.....</i>	<i>93</i>

## *Liste des tableaux*

<i>Tableau I. 1: Bande interdite de différents matériaux .....</i>	<i>20</i>
<i>Tableau I. 2 les types de convertisseurs DC-DC .....</i>	<i>38</i>
<i>Tableau II. 1 : Composants électroniques utilisés. ....</i>	<i>59</i>
<i>Tableau II. 2: Caractéristiques de l'Arduino Uno .....</i>	<i>60</i>
<i>Tableau II. 3 branchements INA169 avec l' Arduino.....</i>	<i>66</i>

## Introduction générale

Depuis la découverte des ressources d'énergies d'origine fossiles (pétrole et gaz), la demande énergétique ne cesse de croître et la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante.

Par conséquent, les énergies renouvelables (solaire, marine, éolienne, etc.) reviennent au premier plan de l'actualité afin de protéger l'environnement et lutter contre les émissions de CO<sub>2</sub> d'une part et de prévenir une pénurie énergétique majeure d'autre part. Aujourd'hui, plusieurs pays dans le monde comme L'USA, le Japon et quelques d'autres pays européens (Italie, Espagne, France, Allemagne) ont investi dans le domaine des énergies renouvelables afin de développer ce marché. Les recherches effectuées ont permis d'améliorer l'efficacité et la rentabilité de ces systèmes et de réduire les coûts des installations.

Actuellement, l'énergie solaire photovoltaïque est la source d'énergie renouvelable la plus utilisée.

En effet, l'énergie solaire photovoltaïque est une solution technique très intéressante et particulièrement dans les régions hors les zones électrifiées. Ces systèmes photovoltaïques sont exploités dans plusieurs applications domestiques et professionnelles et apportent une solution économique intéressante pour couvrir les besoins de base pour les populations qui ne sont pas reliées à un réseau électrique [3].

En effet, plusieurs facteurs ont permis le développement et la progression des systèmes photovoltaïques. Ces principaux facteurs sont :

- Les chocs pétroliers des années 1970
- La prise de conscience mondiale sur la nécessité de revoir les politiques énergétiques.

Tous ces éléments ont permis d'instaurer un nouveau paysage énergétique dont les acteurs dans ce domaine se multiplient, les techniques évoluent, et l'information et la formation sont devenues indispensables [3].

Ce regain actuel d'intérêt pour le photovoltaïque est freiné par plusieurs facteurs tels que le faible rendement des systèmes PV et le problème de couplage entre le module photovoltaïque et la charge de type continue.

Ce dernier peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT).

C'est dans ce contexte que nous avons développé notre projet qui a pour objectif principal le développement d'une procédure qui permet la poursuite du point de la puissance maximale (Maximum Power Point Tracking - MPPT) d'un module photovoltaïque pour l'optimisation des performances du système PV quelques soient les conditions météorologiques (température et éclairage). Ceci nécessite l'implémentation d'une technique de poursuite de point maximale de puissance, telle que la méthode de Perturbation-Observation (P&O), et la méthode d'incrémentation (INC). [11]

Notre projet de fin d'études est basé sur trois chapitres

- Dans le premier chapitre, nous allons donner une généralité sur les systèmes photovoltaïques suivis par les technologies des cellules solaires et ses caractéristiques électriques, et en va voir les différents types de contrôleurs de charge solaires
- Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude des différents composants utilisés pour la réalisation des blocs qui composent notre prototype. [1]
- Enfin, le dernier chapitre qui représente la partie la plus importante de notre mémoire. Elle englobera la partie simulation et la partie réalisation de notre système.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur les systèmes photovoltaïques**

## I.1 Introduction

Afin de remplacer les sources d'énergies fossiles (pétrole, gaz...etc.), il est nécessaire de recourir à de nouvelles formes d'énergie. Pour ce faire, il est intéressant d'installer de systèmes à base d'énergie renouvelable tels que le photovoltaïque, l'éolienne, la biomasse...Etc. Cependant, l'énergie solaire représente la source d'énergie la plus compétitive.

L'énergie solaire photovoltaïque est développée à l'origine pour alimenter les satellites. Aujourd'hui, le photovoltaïque a connu une expansion très importante et devenu une industrie moderne et compétitive. [3]

En effet, les principaux investisseurs sont généralement des sociétés pétrolières ou d'électroniques. Ces investissements permettent d'améliorer la qualité des panneaux solaires photovoltaïques d'une part et d'améliorer la fiabilité des systèmes de stockage d'autre part. [3]

## I.2 Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque permet de convertir le rayonnement lumineux solaire en électricité (figure 1).

Cette transformation, réalisée en utilisant des modules photovoltaïques, génère des tensions et des courants continus.

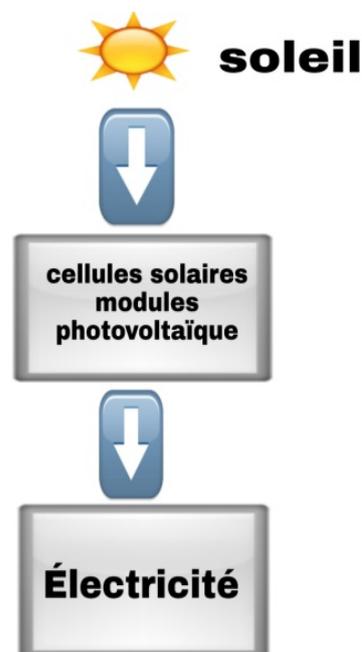


Figure I. 1 Conversion de l'énergie solaire

### I.3 Un système photovoltaïque

L'installation d'un système photovoltaïque nous permet d'assurer l'électrification rurale (alimentation des habitations, des centres de santé.. etc.), et de fournir de l'énergie électrique aux populations isolés (dans des refuges, ou dans des habitations sur îlots) [3].

#### I.3.1 la composition d'un système photovoltaïque

L'énergie électrique produite par les modules PV subit une série de transformations avant d'atteindre le réseau. Ces transformations comprennent notamment des ajustements du courant et de la tension; la conversion CC-CA, ainsi que la distribution de l'énergie entre les voies de stockage et de transmission. Cumulativement, nous pouvons appeler ces opérations le conditionnement de l'énergie.

Le conditionnement de l'énergie est une fonction importante de toute centrale solaire .qui garantit que l'énergie produite peut être fournie aux consommateurs de manière efficace et sûre. Pour réaliser un conditionnement d'énergie adéquat, nous avons besoin d'un certain nombre de composants spécifiques (en plus des modules PV), et nous allons examiner de plus près certains de ces composants et leurs principes de fonctionnement [2]. (Figure I.2)  
Les fonctions (stocker et transformer) ne sont pas toujours présentes, cela dépend du cas de l'utilisation [3].

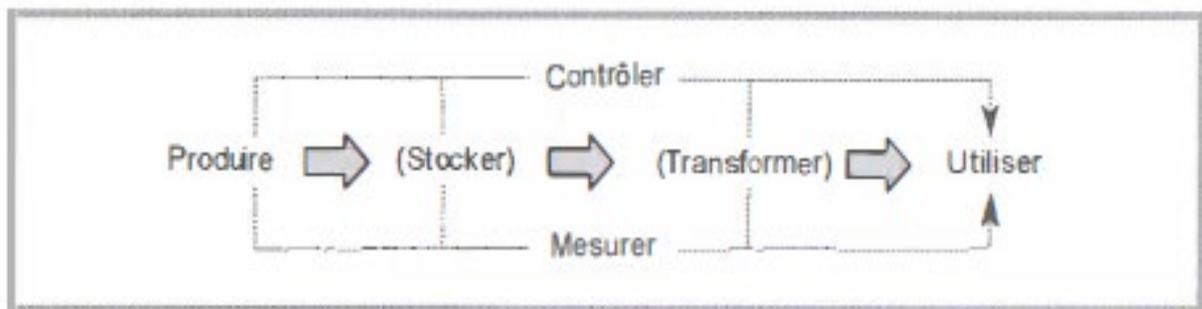


Figure I. 2 Fonctions principales d'un système photovoltaïque [3]

La fonction « Contrôler » est indispensable pour veiller à ce que les éléments du système ne soient pas endommagés et durent le plus longtemps possible. La fonction « Mesurer » est utile pour avoir des informations sur le fonctionnement du système [3].  
Les principaux types et composants qui constituent le système PV sont illustrés dans la figure I.3.

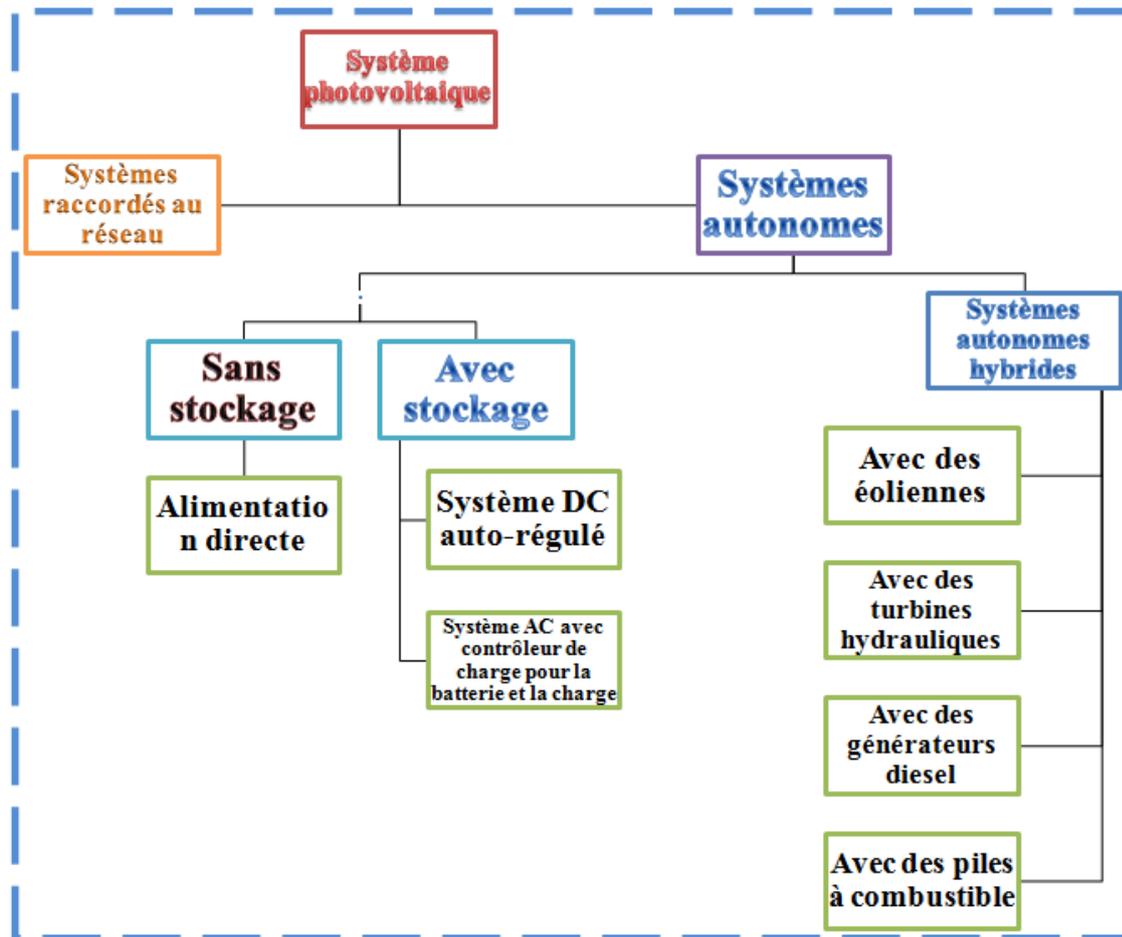


Figure I. 3 Les principaux types de système PV.

- **Systèmes autonomes**

Ce sont les systèmes les plus simples puisque l'énergie photovoltaïque générée est utilisée directement. Ces systèmes autonomes (ou hors réseau) fonctionnent en général sans le réseau électrique, comme le montre la figure I.4. On peut voir que nous attendons une correspondance parfaite entre l'offre et la demande, ou en d'autres termes, entre la taille du système PV et les besoins de la charge. Lorsque cette adéquation est parfaite pour une seule charge, le système PV peut être appelé dans ce cas un " système PV à alimentation direct ". Pour ces systèmes autonomes les composants nécessaires sont très minimales et ils n'ont pas besoin d'ajouter un système de stockage. [4]

Il existe un autre type de système autonome nécessite un système de stockage pour permettre à l'énergie excédentaire d'être stockée lorsqu'elle n'est pas nécessaire à la charge et peut être utilisée ultérieurement lorsque le soleil n'est pas disponible. Ce type peut être connecté directement à des charges en courant continu ou à des charges en courant alternatif par le biais d'un convertisseur DC/AC, ou "onduleur" [4].

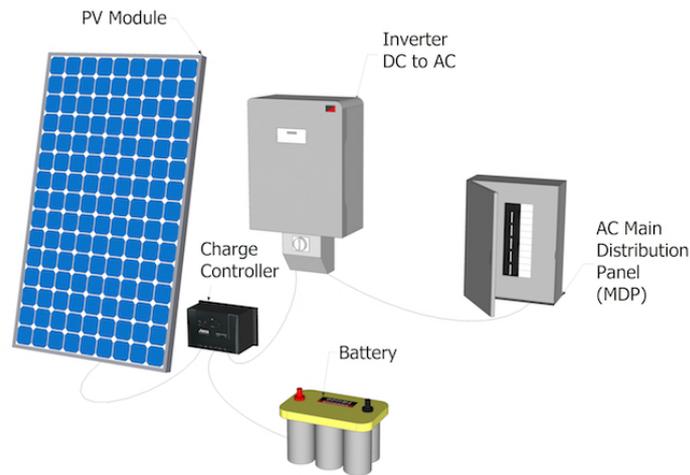


Figure I. 4 Systèmes PV autonomes à courant alternatif [4]

L'autre type courant de système autonome est le " système PV hybride ", illustré à la figure I.5. Le diagramme montre que le système utilise d'autres sources d'énergie en parallèle avec le générateur PV pour alimenter les charges. Ces sources d'énergie peuvent être des éoliennes, des turbines hydrauliques, des générateurs diesel ou des piles à combustible. Les systèmes PV hybrides peuvent également utiliser des batteries pour le stockage de l'énergie [4].

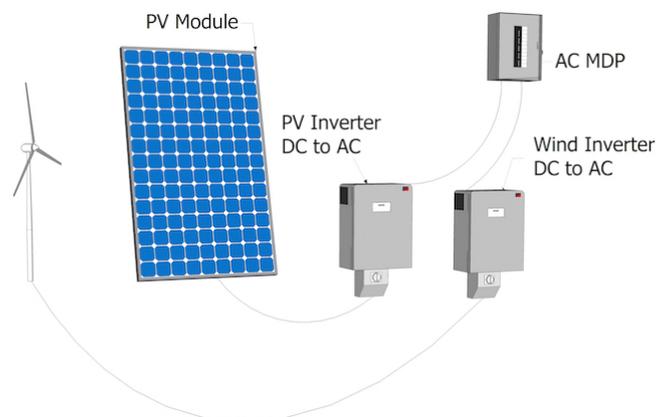


Figure I. 5 Système PV hybride [4]

- **Système connecté au réseau**

Ce type de configuration est le plus utilisé pour les applications où les clients veulent économiser de l'énergie sur leurs factures de services publics et alors que le réseau de services publics existe pour être utilisé lorsque le champ photovoltaïque ne produit aucune énergie. Le module photovoltaïque peut être directement couplé au réseau sans aucun système de stockage et est appelé " système photovoltaïque interactif de service public ou système photovoltaïque relié au réseau ", comme l'illustre la figure I.6. [4]

Il peut également stocker l'énergie excédentaire dans des batteries pour une utilisation ultérieure. Dans ce cas, il s'agit d'un " système PV bimodal ou système PV avec batterie de secours ", comme le montre la figure I.7 [4]

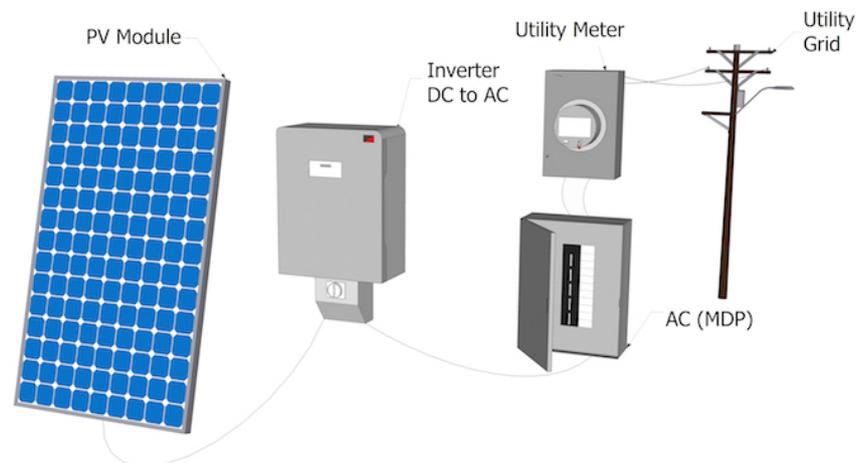


Figure I. 6 Système PV interactif de service public [4]

Le flux d'énergie est représenté dans une liste ci-dessous [4] :

- Module PV
- Onduleur DC à AC
- AC Panneau de distribution principal (MDP)
- Compteur du service public
- Réseau électrique

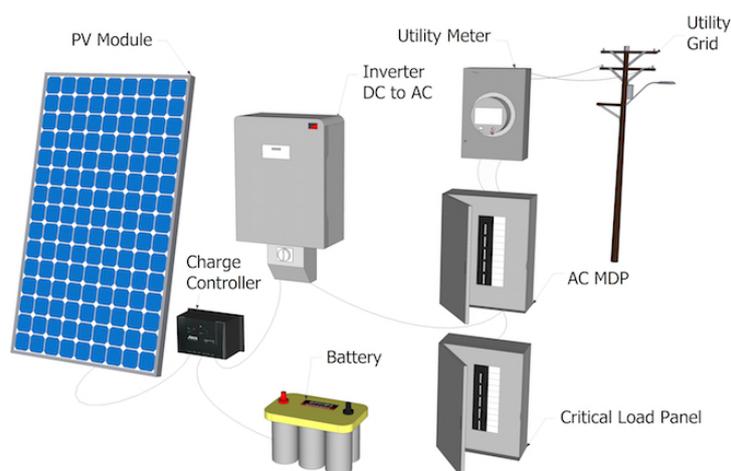


Figure I. 7 système PV bimodal [4]

Le diagramme de ce système montre les différentes parties du système **PV bimodal** (Module PV, Contrôleur de charge, Batterie et onduleur DC à AC, Panneau de distribution principal CA (MDP), Panneau de charge critique et compteur d'électricité) et comment ces différents éléments sont connectés entre eux. [4]

### I.3.2 La conversion de la lumière en électricité

#### ✚ La conversion photovoltaïque

Le mot "photovoltaïque" indique immédiatement l'existence d'une liaison entre la lumière (phot- grec) et l'électricité (volt, unité de potentiel électrique). Cette conversion a lieu grâce à l'effet photovoltaïque. Mais avant d'expliquer ce phénomène physique dans un semi-conducteur, il est important de donner un aperçu sur les semi-conducteurs.

Les semi-conducteurs sont une classe spéciale de matériaux, dont la conductivité n'est pas permanente, mais dépend plutôt de l'énergie disponible pour activer les électrons dans le réseau cristallin. Le silicium cristallin est un matériau semi-conducteur largement utilisé dans le domaine du photovoltaïque. Il devient conducteur lorsque l'énergie des photons absorbés par la surface du cristal est suffisante pour faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction. Cette quantité d'énergie requise pour exciter un électron est définie comme la bande interdite. La bande interdite est une propriété intrinsèque des semi-conducteurs Le schéma suivant figure I.8 illustre le concept de bande interdite [5].

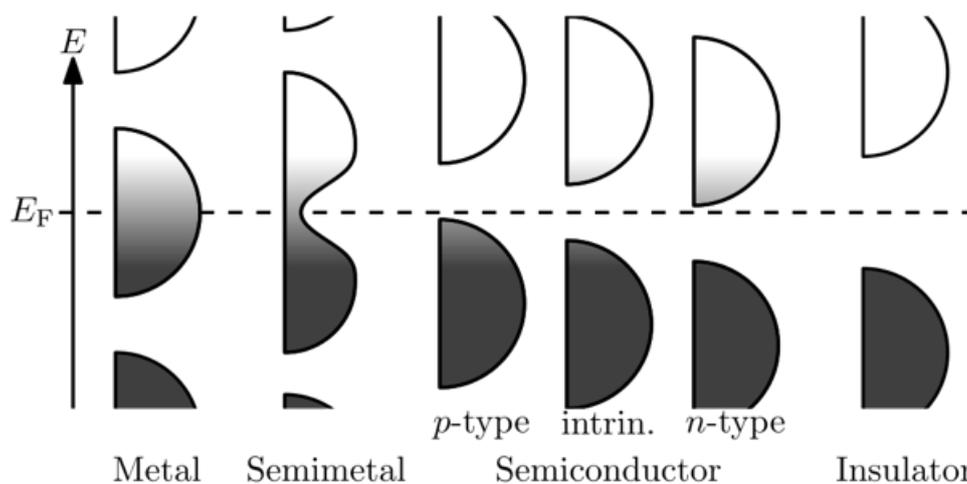


Figure I. 8 Illustration schématique des bandes interdites dans divers matériaux. L'axe vertical représente l'énergie des électrons, et  $E_F$  la position du niveau de Fermi [6]

Dans cette figure, nous pouvons visualiser la différence entre les différentes classes de matériaux: les conducteurs (métaux), les semi-conducteurs et les isolants. Dans un métal, les bandes de valence et de conduction se chevauchent, de sorte qu'il ne faut pas une énergie importante pour libérer les électrons.

Ils sont disponibles pour la conduction dès que le gradient de potentiel est fourni. Dans les isolants, l'écart entre les bandes de valence et de conduction est très important, de sorte qu'il faut tellement d'énergie pour libérer les électrons que cela peut endommager le matériau lui-même. Pour les semi-conducteurs, la situation se situe quelque part entre les deux. La bande interdite est suffisamment grande pour empêcher la conduction spontanée et assurer la séparation des charges, et suffisamment petite pour être compensée par l'énergie des photons.

Les énergies de la bande interdite de quelques matériaux sont répertoriées dans le tableau I.1 ci-dessous. Certains de ces matériaux sont plus adaptés que d'autres aux applications photovoltaïques. Le degré d'adéquation des matériaux aux applications photovoltaïques est déterminé par la proximité de l'énergie des photons par rapport à la bande interdite du matériau et par le fait que l'énergie du photon est suffisante pour couvrir la bande interdite [5]

**Tableau I. 1: Bande interdite de différents matériaux : [7]**

Material		Band Gap (eV)
Si	Silicon	1.11
Ge	Germanium	0.67
CdTe	Cadmium telluride	1.5
Cu <sub>2</sub> O	Copper oxide	2.1
Cu <sub>3</sub> N	Copper nitride	1.75
GaP	Gallium phosphide	2.26
GaAs	Gallium arsenide	1.43
PbS	Lead sulfide	0.37
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Silicon nitride	5
C	Diamond	5.5
SiO <sub>2</sub>	Silica	9

En physique l'énergie des photons dépend de la longueur d'onde de la lumière. Plus la longueur d'onde est courte ( $\lambda$ ), plus la fréquence de la lumière est élevée ( $\nu$ ), et plus elle apporte d'énergie :

$$E = h\nu = h(C/\lambda) \quad (1)$$

Où  $h$  est la constante de Plank, et  $C$  la célérité de la lumière.

Par exemple, pour le côté rouge du spectre de la lumière visible,  $\lambda \approx 700\text{nm}$ , on peut donc trouver:

$$E = 4,136 \times 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s} \times (3 \times 10^8 \text{m/s} / (700 \times 10^{-9} \text{m})) = 1,77 \text{eV}.$$

Dans le même temps, pour le côté violet du spectre visible,  $\lambda \approx 400\text{nm}$ ,

$$E = 4,136 \times 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s} \times (3 \times 10^8 \text{m/s} / (400 \times 10^{-9} \text{m})) = 3,10 \text{eV}.$$

De toute évidence, les photons associés au rayonnement haute fréquence (violet, UV) délivrent plus d'énergie et peuvent être utilisés avec des matériaux à bande interdite plus large [5].

Sur la base de ces réflexions, nous constatons que les matériaux à faible bande interdite (comme le germanium) peuvent être utilisés pour capturer les photons de faible énergie (comme ceux des parties rouge et IR du spectre), et que les matériaux à bande interdite élevée (par exemple le nitrure de cuivre ou le phosphure de gallium) peuvent être utilisés pour utiliser les photons de haute énergie [5].

La combinaison de différents matériaux dans un système permet une utilisation plus efficace du rayonnement disponible. En même temps, si la bande interdite du matériau PV est trop petite par rapport à l'énergie photonique incidente, une quantité importante d'énergie sera convertie en chaleur, ce qui influe négativement sur la caractéristique de la cellule PV [5].

Les données de la figure I.9 montrent comment l'efficacité maximale d'une cellule solaire dépend de la bande interdite. Si la bande interdite est trop élevée, la plupart des photons ne provoqueront pas d'effet photovoltaïque ; si elle est trop faible, la plupart des photons auront plus d'énergie que nécessaire pour exciter les électrons à travers la bande interdite, et le reste de l'énergie sera gaspillé. Les semi-conducteurs couramment utilisés dans les cellules solaires commerciales ont des bandes interdites proches du pic de cette courbe, par exemple le silicium (1,1 eV) ou le CdTe (1,5eV) [5].

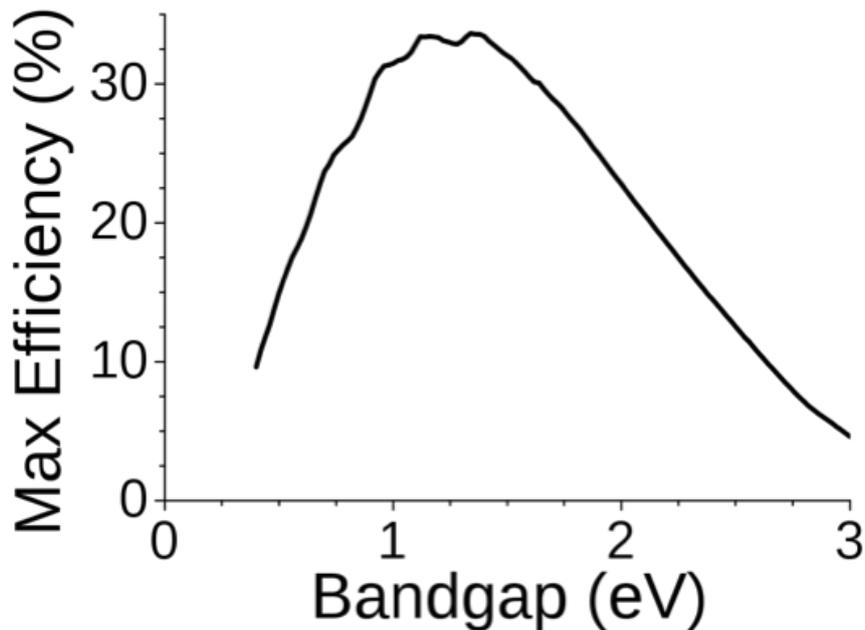


Figure I. 9 La prédiction du rendement maximal d'une cellule solaire en fonction de la bande interdite du matériau [8]

Finalement, nous pouvons résumer quel effet photovoltaïque comprend essentiellement trois étapes principales :

- L'absorption de la lumière (photons).
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques.
- La collecte des charges, le système est capable de générer un courant électrique. [5]

#### 🚦 Jonction P-N :

Si l'effet photovoltaïque se produit facilement dans un certain nombre de matériaux, la troisième étape - La collecte des charges - est probablement la plus délicate d'un point de vue technique. Par exemple, dans un cristal de silicium ordinaire, lorsque l'absorption d'un photon induit la libération d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction, un trou (lieu de charge positive) se forme à sa place dans le réseau cristallin. De plus, l'électron excité et le trou peuvent se recombiner et former l'état excité [9].

Pour augmenter le nombre des paires électrons trous nous utilisons le processus du dopage. Le dopage est souvent utilisé pour modifier la structure du silicium. Par exemple, le bore (B) peut être inclus dans la structure à la place du silicium. Comme le bore a une valence de 3 (contre une valence de 4 pour le silicium), il y a un 'défaut' dans la structure, qui peut accepter un électron. Ce type de semi-conducteur, qui possède des centres positifs pour

accepter les électrons, est un semi-conducteur de type **p**. Le silicium peut également être dopé avec du phosphore (P), qui a une valence de 5 et apporte un électron de valence supplémentaire, qui n'est pas impliqué dans les liaisons covalentes. Cet électron peut être donné. Ce type de semi-conducteur est un semi-conducteur de type **n** [9].

Ainsi, les semi-conducteurs de type **p** ont un excédent de charge positive, et les semi-conducteurs de type **n** ont un excédent de charge négative. Si les types **p** et **n** sont mis ensemble, l'interface entre eux représentera la jonction **p-n** [9].

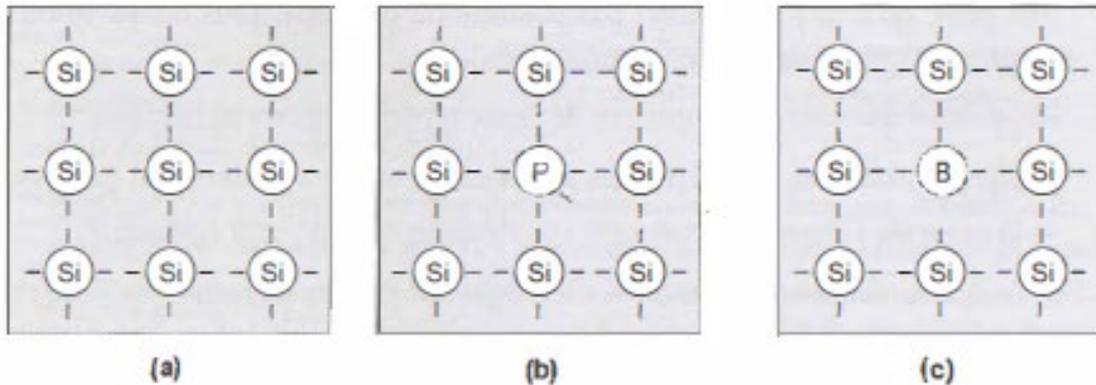


Figure I. 10 a) Silicium pur {intrinsèque}. b) Silicium de type n. c) Silicium de type p [3]

La jonction p-n crée un champ électrique interne dû à la diffusion de charge entre deux types de semi-conducteurs (figure I.11).

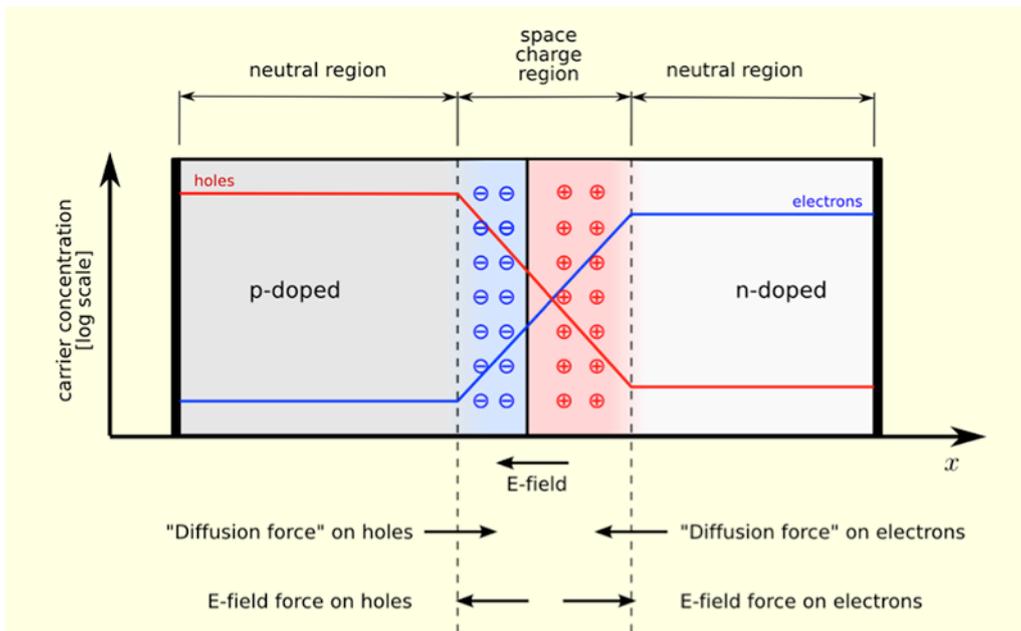


Figure I. 11 Une jonction p-n en équilibre thermique avec une tension de polarisation nulle appliquée [10].

Dans ce schéma, la zone rouge clair est chargée positivement. La zone bleu clair est chargée négativement. Les régions grises sont à charge neutre. Le semi-conducteur de type p possède un excès de trous (collecte de charge positive), comme le montre la position élevée de la courbe rouge sur le côté gauche, et le semi-conducteur de type n possède un excès d'électrons (collecte de charge négative), comme le montre la position élevée de la courbe bleue sur le côté droit. Dans la région de jonction, qui est définie comme une région de charge d'espace, il y a une zone appauvrie en porteurs de charge : les impuretés chargées négativement (représentées par des cercles bleus) "repoussent" les électrons dans le semi-conducteur n, et de même, les impuretés chargées positivement (représentées par des cercles rouges) "repoussent" les trous dans la semi-conductrice p. Cela permet de créer une séparation des porteurs de charge. De même, dans la région centrale appauvrie, la coprésence des atomes d'impureté négatifs et positifs de part et d'autre de la frontière p génère un champ électrique qui maintient cette séparation [9].

En fournissant ensuite un circuit externe (un fil) entre les semi-conducteurs p et n, nous pouvons initier le mouvement de l'électron du côté dopé n vers le côté dopé p, où il se recombine avec un trou. Ce courant électrique photo-induit est l'énergie utilisable qui peut être récoltée [9].

### I.3.3 Caractéristiques électriques

#### Caractéristique courant-tension

Le courant dans les cellules solaires à jonction p-n circule dans le sens de la polarisation inverse de la diode. Dans l'obscurité, la cellule solaire se comporte simplement comme une diode.

La courbe caractéristique d'une cellule solaire est représentée dans la figure I.12. Cette courbe courant-tension représente la variation du courant généré en fonction de la tension appliquée aux bornes de la cellule PV [3].

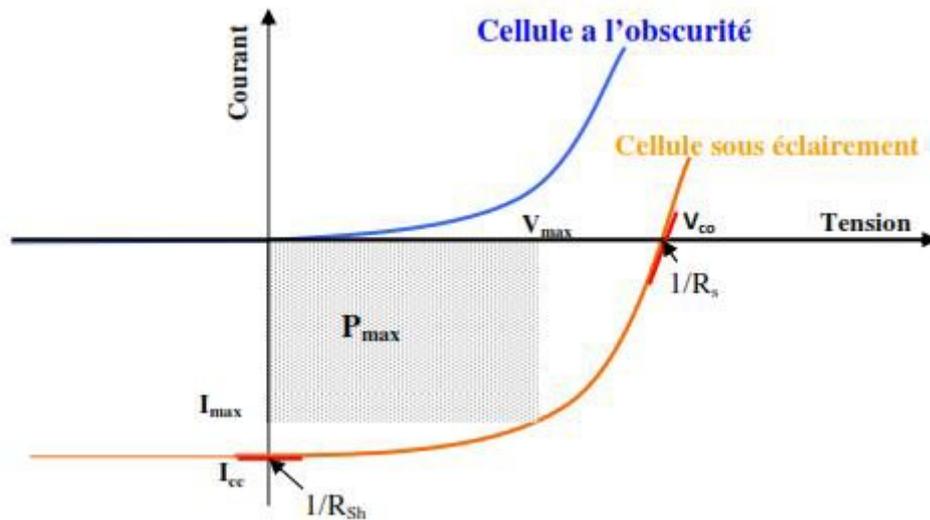


Figure I. 12 Caractéristiques courant tension d'une diode au silicium

L'allure est similaire au caractéristique I-V d'une diode au silicium. L'expression du courant d'une jonction p-n dans l'obscurité est donnée par l'équation (2) (ci dessous).

$$I = I_s(e^{\frac{V}{V_t}} - 1) \quad (2)$$

Avec :

V = tension imposée à la diode

$V_t = kT/q = 26 \text{ mV}$  à 300 K

k =  $1,38 \times 10^{-23}$  constante de Boltzmann

q =  $1,602 \times 10^{-19}$  charge de l'électron

T = température absolue en K

$I_s$  = courant de saturation de la diode.

Lorsque la jonction PN est illuminée, nous constatons un décalage de la caractéristique I-V. Cette différence représente le courant de court circuit ( $I_{cc}$ ). Ce dernier traduit la génération constante du courant par la lumière à tension nulle (en court-circuit)[3].

Sous illumination, l'équation (3) devient :

$$I = I_s(e^{\frac{V}{V_t}} - 1) \quad (3)$$

Avec :  $I_p$  représente le photocourant.

Le courant d'une cellule solaire est proportionnel à l'éclairement et à la surface de la cellule. En effet, lorsque la tension appliquée à la diode est nulle, le courant  $I_{cc}$  est égal au courant généré par la photopile sous la lumière.

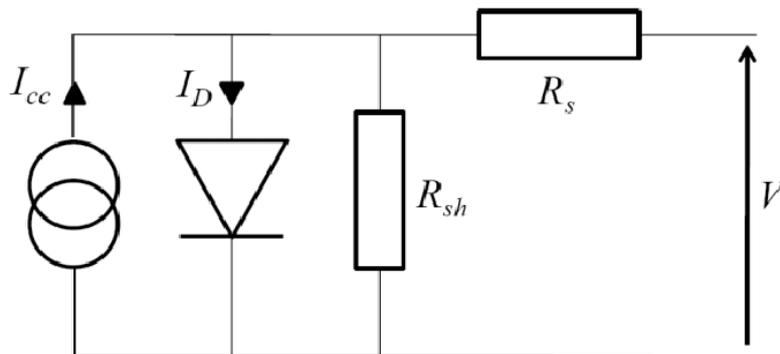
Par ailleurs, à l'aide de cette relation, il est possible de quantifier la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) lorsque le courant est nul. Ce paramètre représente l'égalité du courant de génération par la lumière et du courant de « consommation » de la diode sans lumière [3].

La tension en circuit ouvert d'une cellule solaire varie de manière logarithmique avec l'éclairement.

L'expression de  $V_{co}$  est donnée par l'équation (4).

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln\left(1 + \frac{I_p}{I_s}\right) \quad (4)$$

La figure I.13 représente le schéma équivalent d'une cellule solaire.



**Figure I. 13 Schéma équivalent d'une cellule solaire [3]**

Ce modèle électrique est constitué d'un générateur de courant, une diode bloquante, et deux résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$  pour tenir compte des pertes interne. Avec  $R_s$  représente la résistance série; elle dépend principalement des pertes ohmiques du matériau, des métallisations, et du contact métal/semi-conducteur [3].

La résistance  $R_{sh}$  représente une résistance parallèle provenant de courants parasites créés par des défauts et des impuretés du matériau [3].

L'équation de la caractéristique courant-tension devient :

$$I = I_p - I_s \left[ e^{\frac{q(V+I.R_s)}{kT}} - 1 \right] - \frac{(U+I.R_s)}{R_p} \quad (5)$$

Dans cette configuration, le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), lorsque  $V=0$ , est différent de  $I_p$ .  
Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) : C'est le plus grand courant que le module peut fournir.  
Dans cette configuration, le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), lorsque  $V=0$ , est différent d' $I_p$ .  
Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) : C'est le plus grand courant que le module peut fournir.

## I.4 Puissance et rendement

### I.4.1 Puissance

La partie intéressante de la caractéristique courant-tension, pour l'utilisateur, c'est celle qui génère de l'énergie [3].

La puissance maximale de la photopile représente la puissance fournie au circuit extérieur par un module photovoltaïque sous un éclairage. Elle est située au point 'Pmax' de la caractéristique I-V. Donc ça ne sera ni au point de tension de circuit ouvert, ni au point de court circuit ( $I_{cc}$ ), qui ne génèrent aucune énergie car la puissance est le produit du courant par la tension [3].

En fait, ce point est associé à une tension dite de tension maximale  $V_{pm}$ , et de courant maximal  $I_{pm}$  (voir figure I.14).

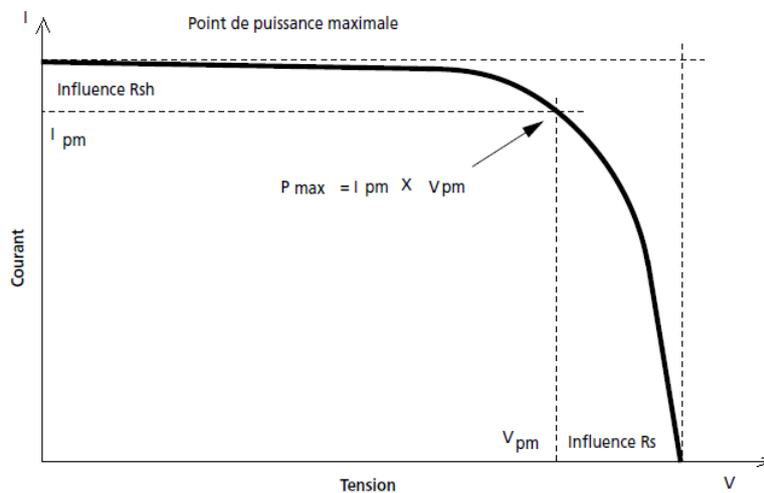


Figure I. 14 Puissance maximale sur une caractéristique [12]

### I.4.2 Facteur de forme

L'analyse de la caractéristique courant -tension de la cellule PV nous permet de constater que plus la courbe est " carrée ", plus la valeur de la puissance maximale ( $P_{max}$ ) est importante [12].

On définit cette propriété par le paramètre "facteur de forme- FF" (ou fill factor). Ce dernier représente le rapport entre  $P_{max}$  (puissance maximale) et la puissance formée par le produit ( $I_{cc} \times V_{co}$ ) [12].

L'expression du "facteur de forme" est donnée par l'équation (6).

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (6)$$

### I.4.3 Rendement

Pour un éclairement considéré  $E$  (généralement exprimé en  $W/m^2$ ), il est intéressant de déterminer le rapport entre la puissance maximale produite ( $P_{max}$ ) et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la surface du module photovoltaïque ( $S$ ) [3].

Ce facteur représente le rendement énergétique. Il est défini par l'expression suivante:

$$\eta = \frac{P_{max}}{E S} \quad (7)$$

Afin d'étudier l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques, nous avons tracé la courbe I-V pour différentes valeurs de  $E$  ( $200w/m^2$ ,  $400w/m^2$ ,  $600w/m^2$ ,  $800w/m^2$ ,  $1000w/m^2$ ). Les résultats sont illustrés dans la figure I.15.

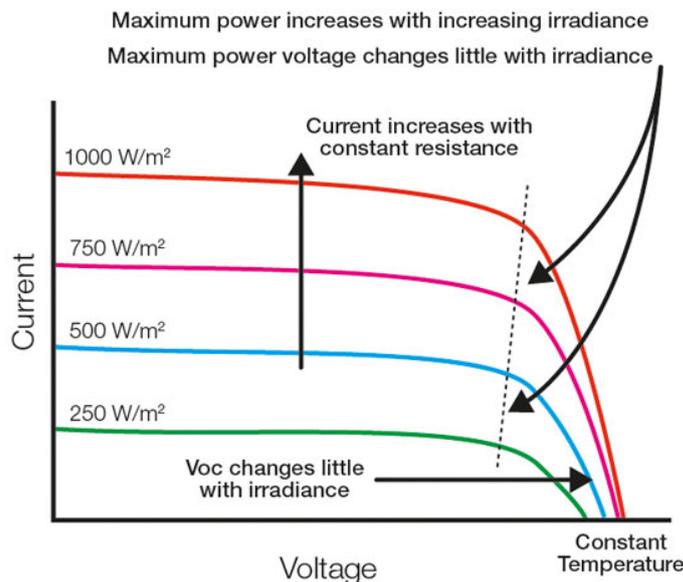


Figure I. 15 Influence de l'éclairement [12]

D'après le graphique, nous remarquons que le courant de court-circuit augmente avec l'éclairage. Par contre, la variation de la tension de circuit ouvert est faible [14].

## I.5 Technologie des cellules solaires

La conversion d'énergie solaire en énergie électrique est réalisée en utilisant des cellules solaires. En effet, lors de l'absorption, les photons induit la création des paires électrons-trous. Si l'énergie de chaque photon est supérieure à l'énergie du gap du matériau semi-conducteur. Par conséquent, grâce à l'existence du champ électrique de la jonction comme le montre la figure I.16, ces paires électrons-trous sont séparées et collectées pour former un courant, appelé photo-courant [13].

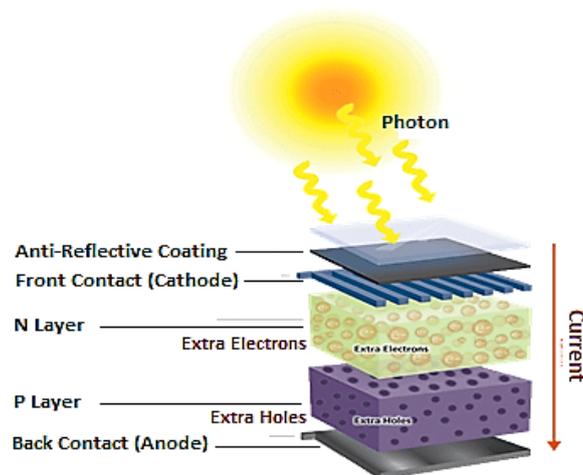


Figure I. 16 Structure d'une cellule photovoltaïque au silicium [13]

Les panneaux photovoltaïques ne sont pas similaires en terme d'efficacité. Cela signifie que certains types et même certaines marques de panneaux solaires peuvent convertir la lumière du soleil en électricité plus efficacement que d'autres [14].

On peut classer les cellules solaires en trois grands types : les cellules à base de silicium cristallin, les cellules à couche mince et les cellules solaires de troisième génération qui combinent les deux types précédents [15].

### I.5.1 Les cellules en silicium cristallin

Environ 90% des cellules solaires sont fabriquées à partir de plaquettes de silicium cristallin (SiC) qui sont découpées à partir de grands lingots réalisés dans les laboratoires. La croissance de ces lingots peut prendre jusqu'à un mois et ils peuvent prendre la forme de cristaux simples ou multiples. Les cristaux uniques sont utilisés pour créer des panneaux et des cellules solaires monocristallins (mono-Si), tandis que les cristaux multiples sont utilisés pour les panneaux et les cellules poly cristallins (multi-Si ou poly c-Si) [15].

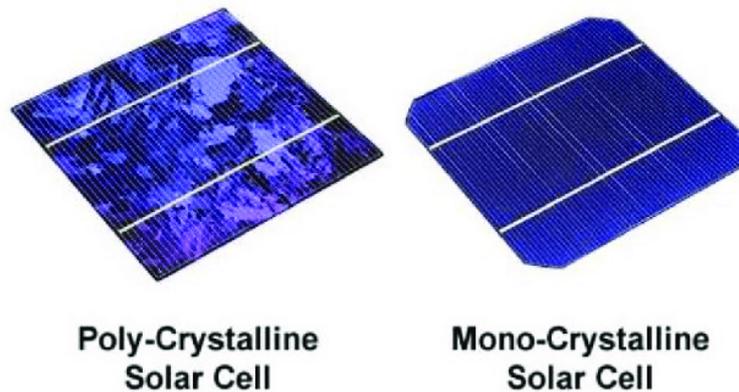


Figure I. 17 Cellules solaires en silicium

### I.5.2 Les cellules solaires à couches minces

Ces cellules à couche mince sont environ 100 fois plus fines que les cellules en silicium cristallin. Ces panneaux solaires sont fabriqués à partir de silicium amorphe (a-Si), dans lequel les atomes sont disposés de manière aléatoire plutôt que dans une structure cristalline ordonnée. Ces films peuvent également être fabriqués à partir de tellure de cadmium (Cd-Te), de di sélénure de cuivre, d'indium et de gallium (CIGS) ou de matériaux photovoltaïques organiques [15].

Toutefois, malgré la flexibilité et le bon prix de ce type de cellules, elles ne sont pas efficaces que les cellules de silicium cristallin ordinaires, qui peuvent produire un rendement de 20 %, ces cellules à couche mince n'atteignent qu'un rendement de 7 % environ. Même les meilleures cellules CIGS atteignent à peine un rendement de 12 % [15].

### I.5.3 Cellules solaires de troisième génération

Les dernières technologies de cellules solaires combinent les meilleures caractéristiques des cellules solaires en silicium cristallin et en couches minces pour offrir un rendement élevé et une meilleure praticité d'utilisation. Elles sont généralement fabriquées à partir de silicium amorphe, de polymères organiques ou de cristaux de pérovskite, et présentent des jonctions multiples constituées de couches de différents matériaux semi-conducteurs.

Ces cellules est moins chères, plus efficaces et plus pratiques que les autres types de cellules, et il a été démontré qu'elles pouvaient atteindre un rendement d'environ 30 % (avec une cellule solaire tandem pérovskite-silicium) [15].

## I.6 Regroupement des cellules

### I.6.1 Connexion en série des modules

Dans certains cas, la tension du système requise pour une centrale électrique est beaucoup plus élevée que ce qu'un seul module PV peut produire. Dans de tels situations, un nombre N de modules PV est connecté en série pour fournir le niveau de tension requis. Cette connexion en série des modules PV est similaire à celle des connexions de N-nombre de cellules dans un module pour obtenir le niveau de tension requis. La figure suivante montre des panneaux PV connectés en série [19].

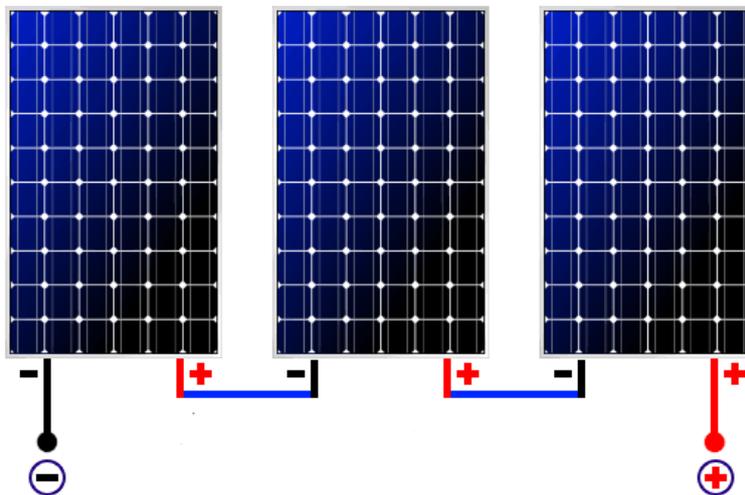


Figure I. 18 Connexion en série des modules [19].

Avec cette connexion en série, non seulement la tension mais aussi la puissance générée par le module PV augmentent également. Pour cela, la borne négative d'un module est connectée à la borne positive de l'autre module [19]

Si un module a une tension de circuit ouvert  $V_{oc1}$  de 20 V et qu'un autre module connecté en série a une tension  $V_{oc2}$  de 20 V, alors le circuit ouvert total de la chaîne est la somme de ces deux tensions [19]

$$V_{oc} = V_{oc1} + V_{oc2} \quad (8)$$

$$V_{oc} = 20 V + 20 V = 40 V$$

Il est important de noter que la somme des tensions au point de puissance maximale est également applicable dans le cas d'un réseau PV.

## I.6.2 Connexion des modules en parallèle

Afin d'augmenter la puissance du système solaire PV, au lieu d'augmenter la tension en connectant les modules en série, il est possible d'augmenter le courant en connectant les modules en parallèle. Dans cette configuration, le courant dans la combinaison parallèle du réseau de modules PV est la somme des courants individuels des modules [19].

La tension dans la combinaison parallèle des modules reste la même que celle de la tension individuelle du module, étant donné que tous les modules ont une tension identique [19].

La combinaison parallèle est obtenue en connectant la borne positive d'un module à la borne positive du module suivant et la borne négative à la borne négative du module suivant, comme le montre la figure suivante [19].

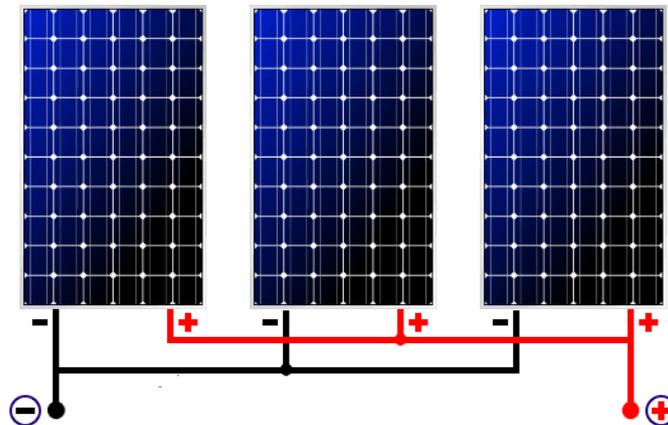


Figure I. 19 Connexion en parallèle des modules

Si le courant  $IM_1$  est le courant de point de puissance maximale d'un module et  $IM_2$  est le courant de point de puissance maximale d'un autre module, alors le courant total du module connecté en parallèle sera  $IM_1 + IM_2$ . Si nous continuons à ajouter des modules en parallèle, le courant continue à augmenter. Cela s'applique également au courant de court-circuit  $I_{sc}$  [19].

## I.6.3 Connexion des modules série-parallèle (Combinaison mixte)

Lorsque nous avons besoin de générer une grande puissance, de l'ordre de plusieurs Gigawatts, comme dans les grandes installations photovoltaïques, nous devons connecter les modules en série et en parallèle. Dans ce cas, les modules sont d'abord connectés en série, appelés "chaînes de modules PV", pour obtenir le niveau de tension requis [19].

Ensuite, de nombreuses chaînes de ce type sont connectées en parallèle afin d'obtenir le niveau de courant nécessaire pour le système. Les figures suivantes montrent la connexion des modules en série et en parallèle. Pour simplifier, regardez à droite dans la figure suivante [19].

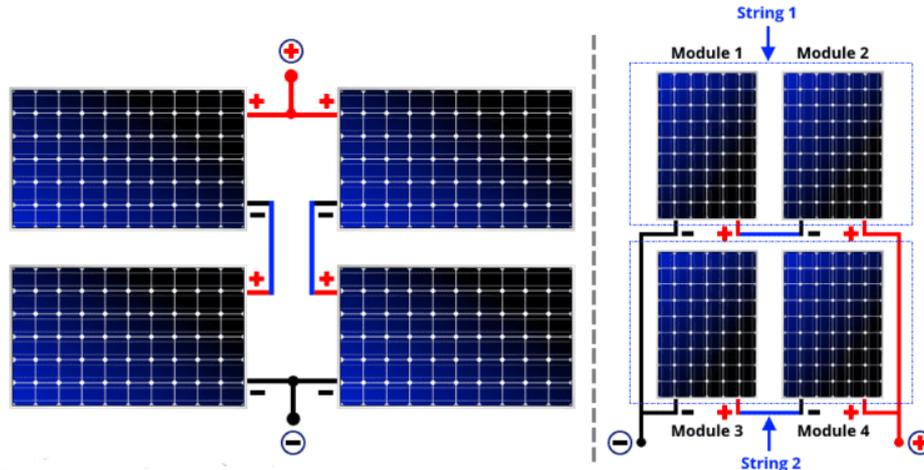


Figure I. 20 Connexion en parallèle des modules en série et en parallèle

Le module 1 et le module 2 sont connectés en série, appelons-les la chaîne 1. La tension à vide de la chaîne 1  $V_{oc1}$  est additionnée, c'est-à-dire que

$$V_{oc1} = V_{oc} + V_{oc} = 2V_{oc} \quad (9)$$

Tandis que le courant de court-circuit de la chaîne 1  $I_{sc1}$  est le même, à savoir

$$I_{sc1} = I_{sc} \quad (10)$$

Comme pour le string 1, les modules 3 et 4 constituent le string 2. La tension à vide de la branche 2  $V_{oc2}$  s'ajoute, c'est-à-dire

$$V_{oc2} = V_{oc} + V_{oc} = 2V_{oc} \quad (11)$$

Alors que le courant de court-circuit du string 2  $I_{sc2}$  est le même, à savoir

$$I_{sc2} = I_{sc} \quad (12)$$

Maintenant, les branches 1 et 2 sont connectées en parallèle, la tension reste la même mais le courant s'ajoute, c'est-à-dire la tension de circuit ouvert du réseau de modules

$$PV_{ocA} = V_{oc1} = V_{oc2} = 2V_{oc} \quad (13)$$

Et le courant de court-circuit de la matrice de modules PV

$$I_{scA} = I_{sc1} + I_{sc2} = I_{sc} + I_{sc} = 2I_{sc} \quad (14)$$

Le même calcul est applicable pour la tension et le courant au point de puissance maximale.

## I.7 Contrôleur de charge solaire

Un contrôleur de charge solaire, est essentiellement un chargeur de batterie solaire connecté entre les panneaux solaires et la batterie. Son rôle est de réguler le processus de charge de la batterie et de s'assurer que la batterie est correctement chargée, ou plus important, qu'elle n'est pas surchargée. Les contrôleurs de charge solaire à couplage CC sont utilisés dans presque tous les systèmes d'énergie solaire hors réseau à petite échelle [17].

Il existe deux principaux types de contrôleurs de charge solaire qui sont le contrôleur PWM et le contrôleur MPPT [17].

### I.7.1 Contrôleurs de charge solaire PWM

Le signal PWM (Pulse Width Modulation) est le moyen le plus efficace pour obtenir une charge de batterie à tension constante en commutant les dispositifs d'alimentation du contrôleur d'un système solaire, Ces dispositifs possèdent une connexion directe entre le panneau solaire et la batterie et utilisent un "interrupteur rapide" de base pour moduler ou contrôler le processus de la charge de la batterie. L'interrupteur (généralement un transistor) est ouvert jusqu'à ce que la batterie atteigne la tension de charge d'absorption. Ensuite, l'interrupteur commence à s'ouvrir et se fermer rapidement (des centaines de fois par seconde). Pour ce type, le courant provenant du panneau solaire diminue en fonction de l'état de la batterie et les besoins de recharge [18].



Figure I. 21 Contrôleurs de charge solaire PWM [17].

### I.7.2 Contrôleurs de charge solaire MPPT :

Un MPPT (maximum power point tracker) est un convertisseur électronique de courant continu en courant continu qui optimise la correspondance entre le panneau solaire et la batterie ou le réseau électrique. En d'autres termes, il convertit la tension de sortie plus

élevée des panneaux solaires en une tension plus faible et adéquate pour charger les batteries [19].

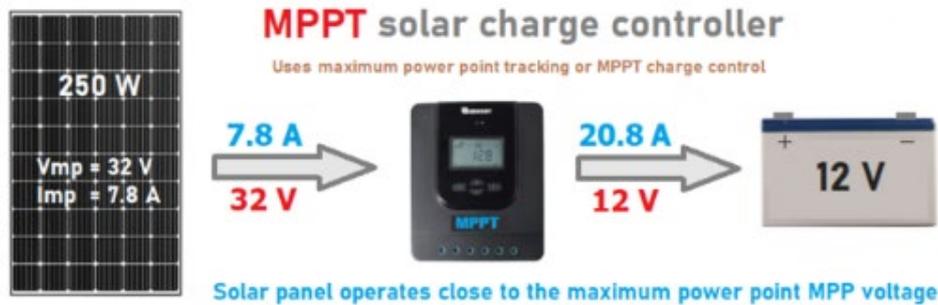


Figure I. 22 Contrôleurs de charge solaire MPPT [17].

Ce système présente une conversion de puissance doté d'un algorithme de contrôle approprié afin d'extraire la puissance maximale de la source PV indépendamment des changements des conditions de fonctionnement. La maximisation de la puissance fournie peut être obtenue en réglant la tension ou le courant du panneau afin de s'assurer que le convertisseur fonctionne correctement au point de puissance maximale ( $P_{max}$ ) sur la courbe P-V [20].

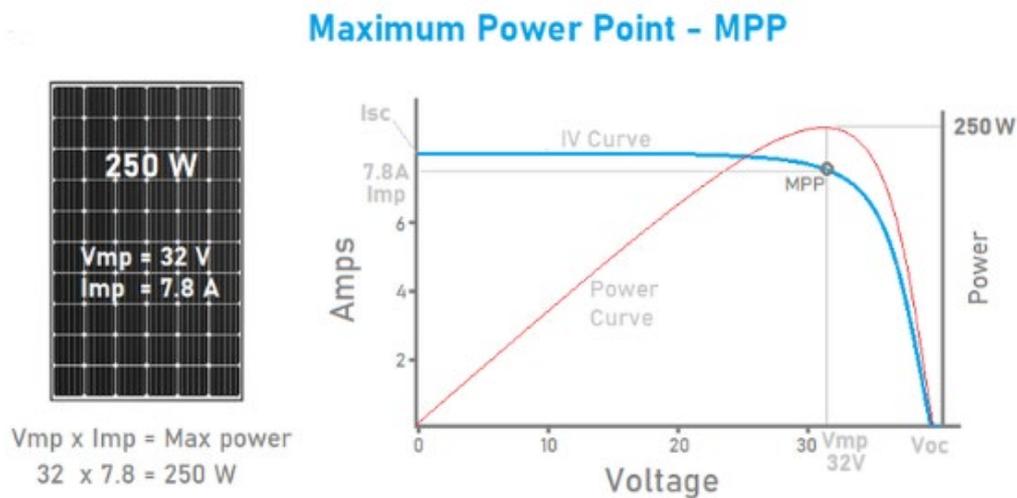


Figure I. 23 Point de puissance maximale [17].

### I.7.3 Différence entre PWM et MPPT

Dans l'exemple de la figure I.24, un panneau solaire commun de 60 cellules (24V) avec une tension de fonctionnement de 32V ( $V_{max}$ ) est connecté à une batterie de 12V en utilisant à la fois un régulateur de charge PWM et un Contrôleurs MPPT. Avec le régulateur PWM, la tension du panneau doit baisser pour correspondre à celle de la batterie, ce qui réduit

considérablement la puissance de sortie. Avec un contrôleur de charge MPPT, le panneau peut fonctionner à son point de puissance maximale et générer ainsi beaucoup plus d'énergie [17].

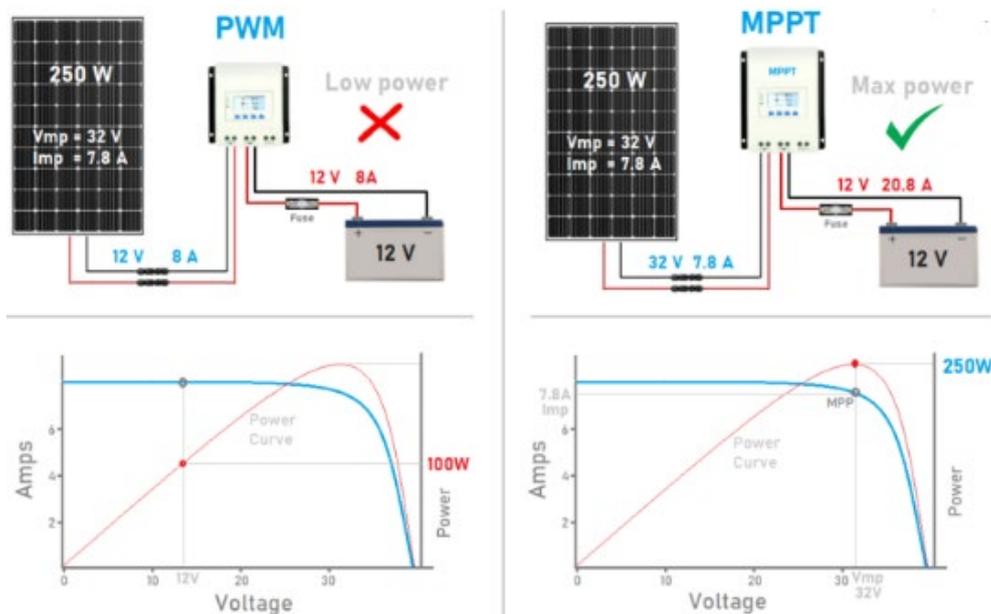


Figure I. 24 PWM et MPPT [17].

Le contrôleur MPPT possède plusieurs avantages et représente le principal objet de charge solaire en raison de l'efficacité accrue de la charge ainsi que l'amélioration des performances du système. Pour cela, nous avons choisis d'utiliser le contrôleur MPPT dans notre projet au lieu d'un contrôleur de charge standard comme le PWM.

Le contrôleur MPPT est constitué d'un circuit très important qui est le convertisseur DC-DC dont le rapport cyclique varie pour suivre le point de puissance maximale.

Cet étage joue le rôle d'étage d'adaptation entre le module PV et la charge en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le panneau PV pour qu'elle soit la plus proche possible de P<sub>MAX</sub> disponible [23].

#### I.7.4 Les types des convertisseur DC-DC

La figure I.25 montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge.

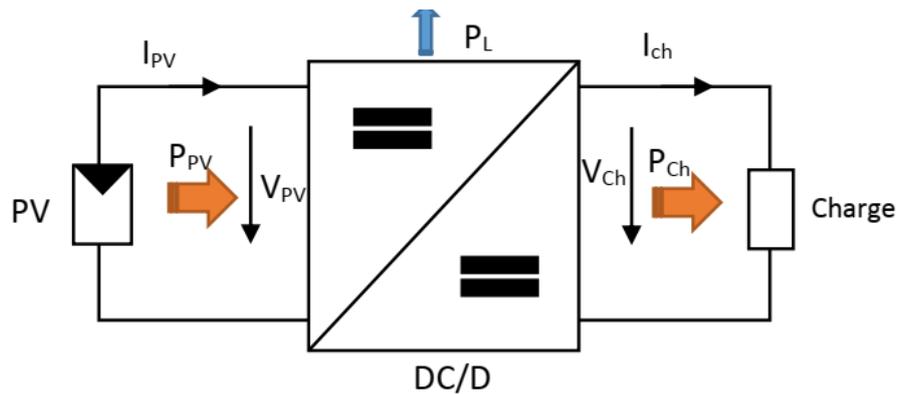


Figure I. 25 convertisseurs DC-DC [23]

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Les dispositifs qui constituent ces convertisseurs d'énergie (hacheurs) sont des condensateurs, des inductances et des commutateurs.

Dans le cas idéal, tous ces composants ne consomment aucune puissance active. C'est la raison pour laquelle nous obtenons de bons rendements [24].

Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur, généralement un transistor MOSFET ou un IGBT fonctionnant en mode (bloqué/saturé) de faible temps de commutation, pour minimiser les pertes de puissance [24].

Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro d'où une dissipation de puissance nulle.

Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très faible [48].

### I.7.4 Présentation de quelques types de convertisseurs DC-DC

Il existe plusieurs types de convertisseurs DC-DC. Ces différents types sont résumés dans le tableau suivant [24].

**Tableau I. 2 les types de convertisseurs DC-DC [24]**

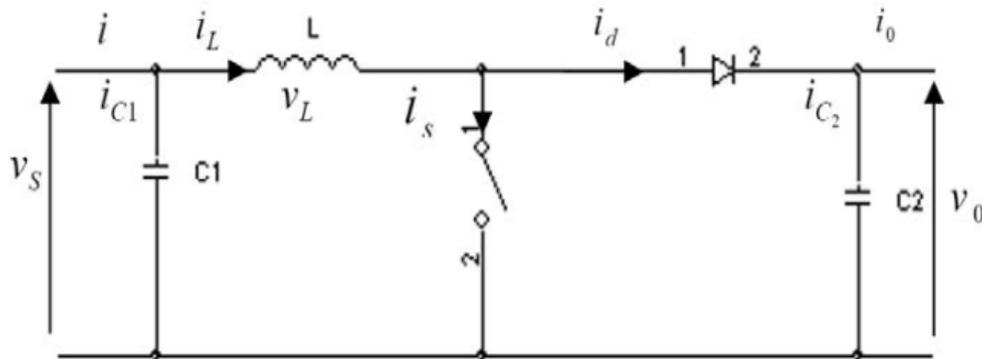
Type	Fonction	Interrupteur	Diode	Transformateur	Complexité
Buck	Abaisseur	1	1	Non	Faible
Boost	Élévateur	1	1	Non	Faible
Buck-Boost	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Non	Faible
Flyback	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Half Forward	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Push Pull	Abaisseur/ Elévateur	2	2	Oui	Forte
Half Bridge	Abaisseur/ Elévateur	2	2	Oui	Forte
Full Bridge	Abaisseur/ Elévateur	4	4	Oui	Très Forte

**🚦 Convertisseur Boost**

Un convertisseur Boost (ou élévateur) sert à convertir une tension continue d'entrée en une tension de sortie plus élevée [49].

La figure (I. 26) représente le circuit équivalent du convertisseur Boost.

Ce dernier se compose essentiellement d'un interrupteur placé en parallèle avec la source, d'une inductance L, une diode D pour protéger l'interrupteur en empêchant le retour du courant, et d'un condensateur C2 qui sert à lisser la tension de sortie



**Figure I. 26 Convertisseur élévateur (Boost) [49]**

Pour la première période  $[0, d.T_s]$  S se ferme et la diode est polarisée en inverse. L'inductance L se charge et le courant délivré par la source commence à augmenter progressivement [49].

La diode D est bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation (voir figure I.27)

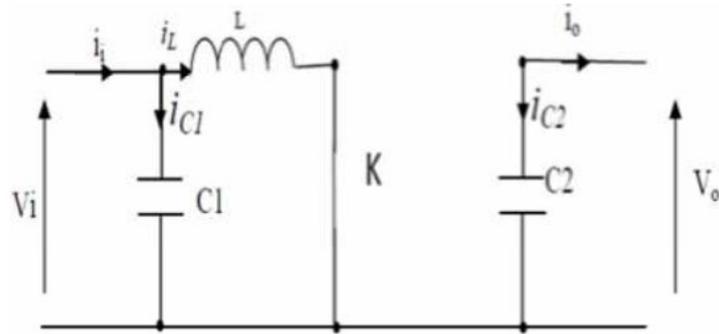


Figure I. 27 Convertisseur Boost durant l'état ON [50]

L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents (figure I.27) pendant cet intervalle de temps nous donne

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_L(t)}{dt} = i(t) - i_L(t), \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -i_o(t), \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_s(t). \end{cases} \quad (15)$$

Pour la deuxième période  $(1-d) T_s$ , S est ouvert et L libère la tension emmagasinée qui s'ajoute à celle de la source pour alimenter la charge (voir figure I.28).

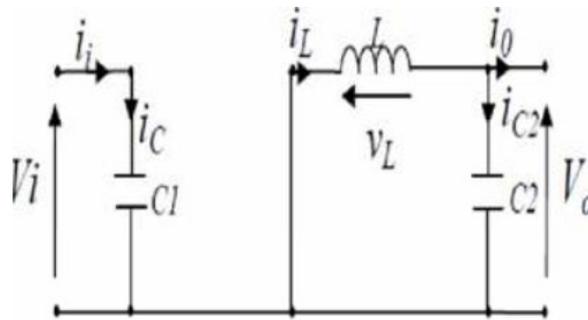


Figure I. 28 Convertisseur Boost durant l'état OFF [50]

On obtient l'ensemble suivant d'équations :

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_s(t)}{dt} = i(t) - i_L(t), \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t), \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_s(t) - V_o(t). \end{cases} \quad (16)$$

A partir des équations (15) et (16), on peut écrire l'équation suivante :

$$(V_s)DT_s = (V_o - V_s) * (1 - D) * T_s \quad (17)$$

Le rapport de conversion  $M(D)$  s'écrit sous la forme suivante :

$$M(D) = \frac{V_0}{V_s} = \frac{1}{1 - D} \quad (18)$$

### 🚦 Convertisseur buck

Le convertisseur DC/DC abaisseur, représenté dans la Figure I.29, permet de convertir la tension de la source  $V_s$  en une tension de sortie plus basse  $V_o$  [56,57]. Ce convertisseur est constitué d'un commutateur  $S$ , de la diode  $D$ , pour la protection de l'interrupteur  $S$ , et une inductance  $L$  [49].

Le schéma d'un convertisseur Buck est représenté dans la figure ci-dessous

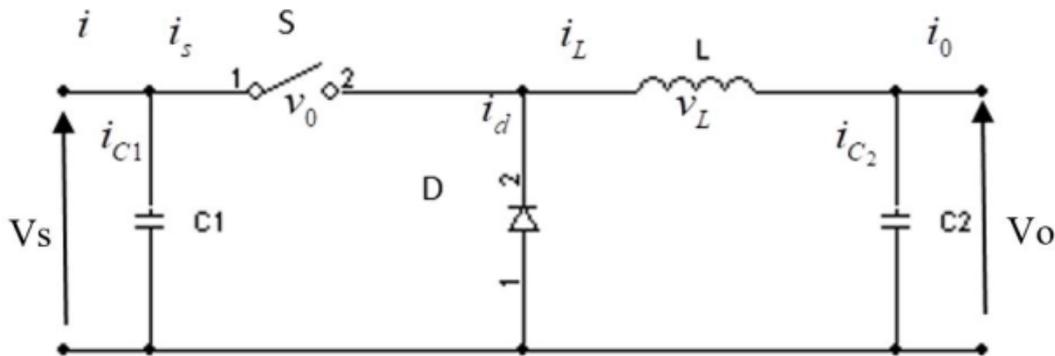


Figure I. 29 Circuit de base du convertisseur buck [49]

Lorsque l'interrupteur  $S$  est fermé, le courant  $i(t)$  circule vers la charge à travers l'inductance  $L$  qui se charge au fur et à mesure que le courant  $i(t)$  augmente durant la période  $[0, d.T_s]$  [49].

Ainsi, durant cette première phase de fonctionnement, le courant  $i(t)$  recharge au même temps le condensateur  $C$ .

Pour l'intervalle  $[d.T_s, T_s]$  et lorsque l'interrupteur  $S$  s'ouvre, l'inductance  $L$  libère son énergie emmagasinée sous forme magnétique à la charge. Dans cette deuxième phase de fonctionnement, la diode  $D$  est en état de conduction afin de protéger l'interrupteur  $S$ . La tension et le courant de sortie sont en fonction du rapport cyclique et de la fréquence [2, 7, 8] [49].

Pour étudier et modéliser le convertisseur abaisseur, il est important d'analyser le fonctionnement du circuit équivalent pour  $S$  ouvert et fermé.

- Pour  $S$  fermé, les schémas équivalents du hacheur abaisseur est représentée dans la Figure I. 30

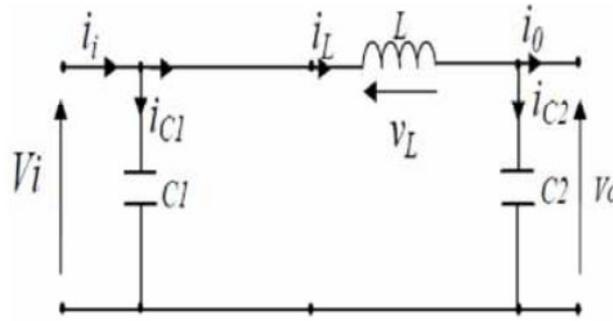


Figure I. 30 le Schémas équivalents du hacheur abaisseur (S fermé) [49]

En appliquant les lois de Kirchhoff sur le circuit de la Figure I.30 nous obtenons le système d'équations suivant

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_s(t)}{dt} = i(t) - i_L(t), \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t), \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_s(t) - V_o(t). \end{cases} \quad (19)$$

Pour S ouvert, les schémas équivalents du hacheur abaisseur est représentée dans la Figure I.31

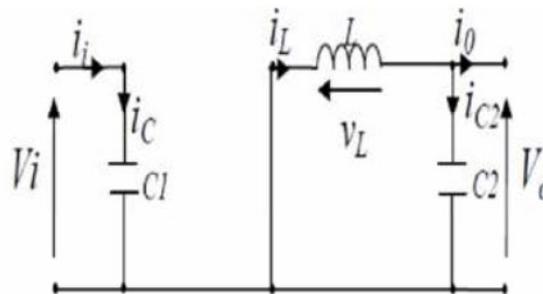


Figure I. 31 Schémas équivalents du convertisseur buck (S ouvert) [51]

Pour cette deuxième période nous obtenons le modèle mathématique suivant

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_s(t)}{dt} = i(t), \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_o(t). \end{cases} \quad (20)$$

En régime permanent, la tension moyenne d'inductance est égale à zéro. Par conséquent, la relation de la tension d'entrée Vs et de sortie Vo en fonction du rapport cyclique D est donnée par l'équation suivante (21) :

$$(V_s - V_0)D T_s = V_0(1 - D)T_s \quad (21)$$

A partir de cette équation (22), le rapport de conversion du convertisseur Buck est donné par l'expression suivante :

$$M(D) = \frac{V_0}{V_s} = D \quad (22)$$

Le rapport de conversion  $M(D)$  varie proportionnellement avec le rapport cyclique de commutation  $D$

### ✚ Convertisseur Buck - Boost

Un convertisseur Buck-Boost est un type d'alimentation à découpage qui combine les principes du convertisseur Buck et du convertisseur Boost dans un seul circuit.

En combinant ces deux types (Buck et Boost), il est possible d'obtenir un circuit régulateur capable de gérer une large gamme de tensions d'entrée supérieures ou inférieures à celles requises par le circuit. Heureusement, les convertisseurs Buck et Boost utilisent des composants très similaires ; il suffit de les réorganiser en fonction du niveau de la tension d'entrée. [56]

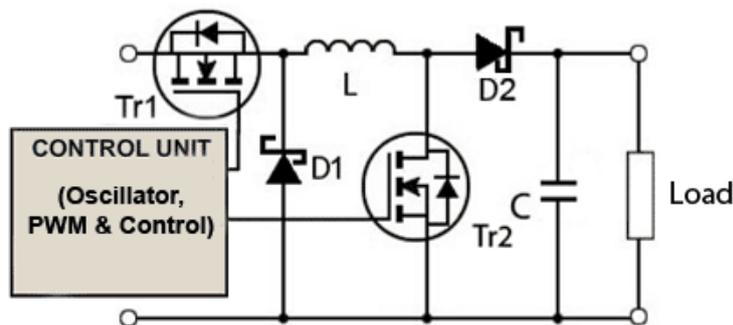
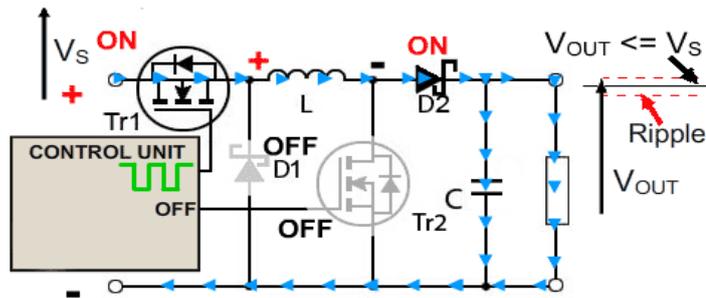


Figure I. 32 Convertisseurs Buck et Boost combines. [56]

Dans la figure I.32, les composants communs des circuits Buck et Boost sont combinés. Une unité de commande est ajoutée, qui détecte le niveau de la tension d'entrée, puis sélectionne l'action appropriée du circuit. (Notez que dans les exemples de cette section, les transistors sont représentés par des MOSFET, couramment utilisés dans les convertisseurs de puissance haute fréquence, et les diodes par des Schottky. Ces diodes ont une faible tension de jonction directe lorsqu'elles sont conductrices, et sont capables de commuter à des vitesses élevées). [56]

• **Fonctionnement comme un convertisseur Buck**

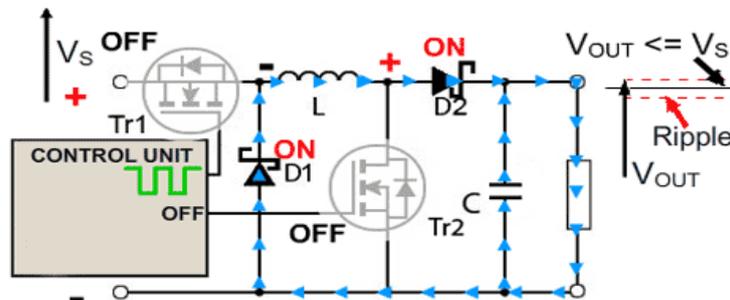
La figure I.33 montre le circuit fonctionnant comme un convertisseur Buck. Dans ce mode, Tr2 est désactivé, et Tr1 est activé et désactivé par une onde carrée à haute fréquence provenant de l'unité de commande. Lorsque la grille de Tr1 est haute, le courant traverse L, chargeant son champ magnétique, chargeant C et alimentant la charge. La diode Schottky D1 est désactivée en raison de la tension positive sur sa cathode. [56]



**Figure I. 33 Fonctionnement comme un convertisseur Buck pendant la période d'activation de Tr1.. [56]**

La figure I.34 montre le flux de courant pendant le fonctionnement en boucle du circuit lorsque l'unité de contrôle désactive le Tr1. La source initiale de courant est maintenant l'inducteur L. Son champ magnétique s'effondre, la f.e.m. arrière générée par l'effondrement du champ inverse la polarité de la tension aux bornes de L, ce qui allume  $D1$  et le courant circule à travers  $D2$  et la charge. [56]

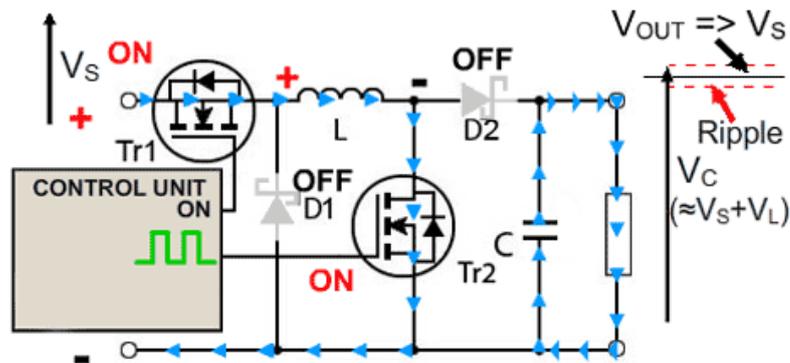
A mesure que le courant dû à la décharge de L diminue, la charge accumulée dans C pendant la période d'activation de Tr1 s'ajoute maintenant au courant circulant dans la charge, ce qui maintient  $V_{OUT}$  raisonnablement constant pendant la période de désactivation. Ceci permet de maintenir l'amplitude de l'ondulation à un minimum et  $V_{OUT}$  proche de la valeur de  $V_s$ . [56]



**Figure I. 34 Fonctionnement comme un convertisseur buck pendant la période d'arrêt de Tr1 [56]**

- **Fonctionnement comme un convertisseur Boost**

En mode convertisseur Boost, Tr1 est activé en permanence et l'onde carrée haute fréquence est appliquée à la grille de Tr2. Pendant les périodes d'activation où Tr2 est passant, le courant d'entrée circule à travers l'inducteur L via Tr2, retourne directement à la borne négative de l'alimentation en chargeant le champ magnétique autour de L. Pendant ce temps, D2 ne peut pas conduire car son anode est maintenue au potentiel de la masse par Tr2 qui est fortement conducteur. Pendant la durée de la période d'activation, la charge est entièrement fournie par la charge du condensateur C, accumulée lors des cycles précédents de l'oscillateur. La décharge progressive de C pendant la période d'activation (et sa recharge ultérieure) explique la quantité d'ondulation à haute fréquence sur la tension de sortie, qui est à un potentiel d'environ  $V_S + V_L$ . Voir figure I.35. [56]



**Figure I. 35 Fonctionnement comme un convertisseur Boost pendant la période d'activation de Tr2. [56]**

Au début de la période d'arrêt de Tr2, L est chargé et C est partiellement déchargé. L'inducteur L génère maintenant une f.e.m. de retour et sa valeur dépend du taux de changement du courant lorsque Tr2 commute et de la quantité d'inductance que possède la bobine ; par conséquent la f.e.m. de retour peut être n'importe quelle tension sur une large gamme, selon la conception du circuit. Remarquez en particulier que la polarité de la tension aux bornes de L s'est maintenant inversée et qu'elle s'ajoute à la tension d'entrée  $V_S$  pour donner une tension de sortie au moins égale ou supérieure à la tension d'entrée. D2 est maintenant polarisé dans le sens direct et le courant du circuit fournit donc le courant de charge, et en même temps recharge le condensateur à  $V_S + V_L$ , prêt pour la prochaine période d'activation de Tr2. Voir figure I.36. [56]

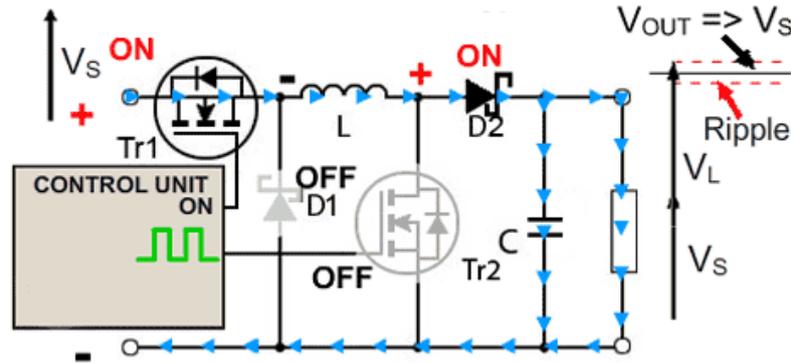


Figure I. 36 Fonctionnement comme un convertisseur Boost pendant la période "off" de Tr2. [56]

Enfin, Le choix de la structure du convertisseur DC-DC utilisé pour l'adaptation source-charge dépend de la charge à alimenter ; dans notre cas l'objectif est de réaliser un chargeur solaire de batterie. Pour cela, nous avons utilisé un générateur de tension (pour représenter le panneau photovoltaïque composé d'un seul module constitué de 36 cellules d'une tension de circuit ouvert :  $V_{co}=25$  Volts et un courant de court-circuit  $I_{cc}=0.5$  Ampère destiné à charger une batterie de 12 Volts donc le système nous impose d'utiliser un convertisseur de type abaisseur pour diminuer la tension délivrée par le panneau [47].

### I.8 Le choix de batterie dans le système PV

La plupart des contrôleurs de charge solaire MPPT peuvent être utilisés avec une gamme de tensions de batterie différentes. Par exemple, la plupart des petits contrôleurs de charge de 10A à 40A peuvent être utilisés pour charger une batterie de 12V ou 24V, tandis que la plupart des contrôleurs de plus grande capacité, ou à tension d'entrée plus élevée, sont conçus pour être utilisés sur des systèmes de batterie de 24V ou 48V [17].

La taille maximale du panneau solaire qui peut être connecté à un contrôleur de charge solaire est généralement limitée par la tension de la batterie. L'utilisation d'une batterie de 24V permet de connecter plusieurs de modules PV avec un contrôleur de charge solaire de 20A par rapport une batterie de 12V [17].

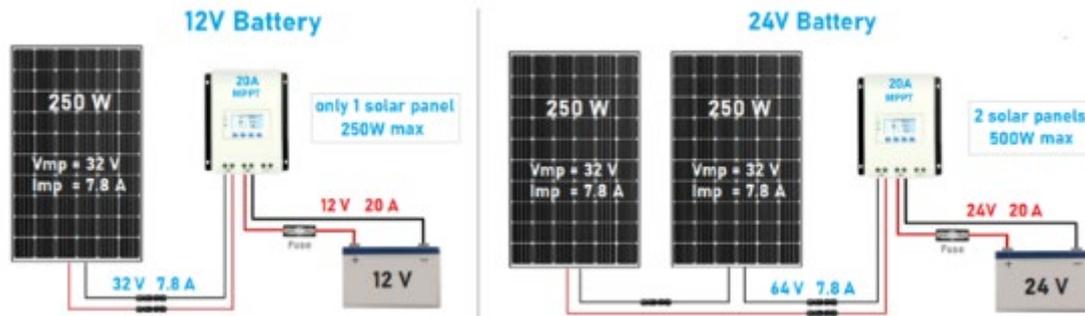


Figure I. 37 Option de choix de batterie

La figure ci-dessus montre comment l'utilisation d'une batterie de 24V, permet de connecter plus de panneaux solaires en utilisant le même contrôleur de charge solaire de 20A [17]

Sur la base de la loi d'Ohm et de l'équation de puissance, des tensions de batterie plus élevées permettent de connecter davantage de panneaux solaires. Cela est dû à la formule simple

$$\text{Puissance} = \text{Tension} \times \text{Courant}$$

Par exemple  $20A \times 12,5V = 250W$ .

Tandis que  $20A \times 25V = 500W$ .

### I.8.1 Principes de base des chargeurs de batterie

Un cycle de charge de batterie décrit la relation entre la tension et le courant dans une batterie lorsque le chargeur restitue la capacité énergétique à la batterie. Les différentes compositions chimiques des batteries, telles que l'acide de plomb, le Ni-Cad, etc. nécessitent différentes méthodes de charge.

Puisque on va utiliser une batterie au lead-acide qui nécessite d'utiliser le cycle de charge à trois états [54].

### I.8.2 Cycle de charge en trois étapes

La charge en trois étapes est la méthode que la plupart des fabricants de batteries au plomb recommandent comme la meilleure et la plus efficace pour redonner toute la capacité à la batterie et prolonger sa durée de vie [54].

### **I.8.2 .1 Étape 1 : charge à courant constant ou mode de charge bulk**

En supposant que la batterie démarre dans un état déchargé, le chargeur fonctionne en mode courant constant, où le courant du chargeur est maintenu à une valeur constante et la tension de la batterie est autorisée à augmenter pendant sa recharge. Environ 80 % de la capacité de la batterie est restituée dans la région du courant constant [54].

### **I.8.2 .2 Étape 2 : mode d'absorption**

Lorsque la tension de la batterie atteint environ 2,4 volts par cellule, ou 14,6 volts pour une batterie de 12 V, la tension du chargeur est maintenue constante à ce niveau et le courant de la batterie peut diminuer. C'est dans cette région que les derniers 20 % de la capacité de la batterie sont restitués. Ce niveau de tension est maintenu jusqu'à ce que le courant de la batterie se réduise à environ  $C/50$  à  $C/100$ , où  $C$  est la valeur nominale en ampères-heures de la batterie. Par exemple, s'il s'agit d'une batterie de 100 ampères-heures, la tension doit être maintenue à 2,5 V par cellule jusqu'à ce que le courant diminue entre 1 et 2 ampères [54].

### **I.8.2 .3 Étape 3 : mode flottant**

Au point où le courant est réduit de  $C/50$  à  $C/100$ , le chargeur de batterie passe en mode flottant. Le mode flottant est l'endroit où la tension de la batterie est maintenue à environ 2,25 volts par cellule, ou 13,5 volts pour une batterie 12V. Cette tension maintiendra l'état de pleine charge de la batterie sans faire surchauffer notre électrolyte ni surcharger la batterie [54].

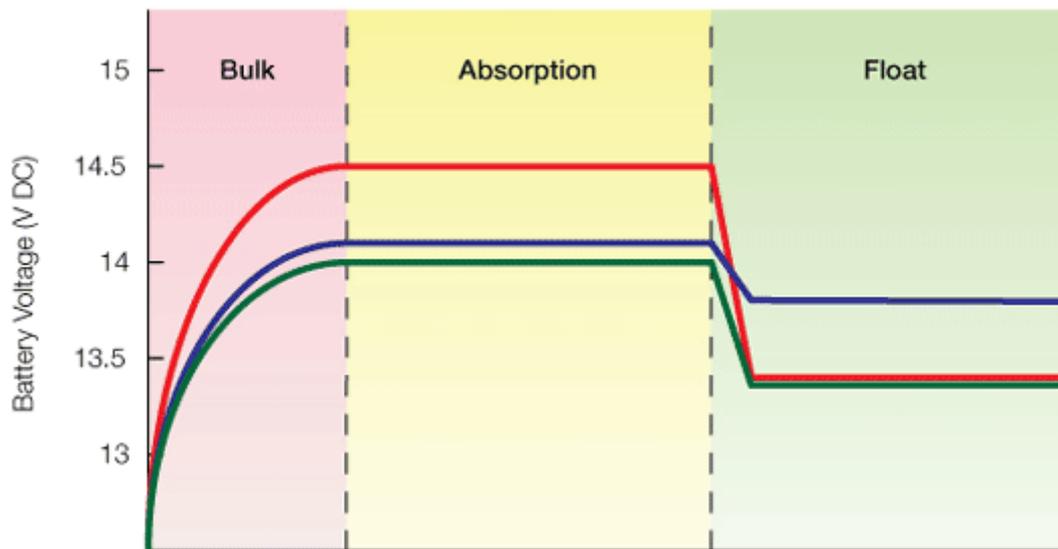


Figure I. 38 Schéma de charge en trois étapes pour les batteries plomb-acide scellées [54]

## I.9 Description du système PV basé sur le MPPT pour l'application DC-DC

### I.9.1 Contrôleur MPPT basé sur le courant ou la tension :

La figure I.39 présente le contrôleur MPPT en conjonction avec le convertisseur DC/DC. On peut voir que seul le système DC est présenté ici. Cependant, il peut être étendu à un système PV connecté au réseau en ajoutant des dispositifs électroniques de puissance tels que l'onduleur [21].

En général, la méthode MPPT basée sur la tension ou le courant fonctionne en mesurant la tension et le courant du panneau PV. En utilisant ces informations, le rapport cyclique est calculé par le contrôleur PI, appelé aussi correcteur PI (proportionnel, intégral) est un système de contrôle permettant d'améliorer les performances d'un asservissement c'est-à-dire un système en boucle fermée, et par conséquent le convertisseur DC/DC est forcé d'extraire le MPP du panneau PV [22].

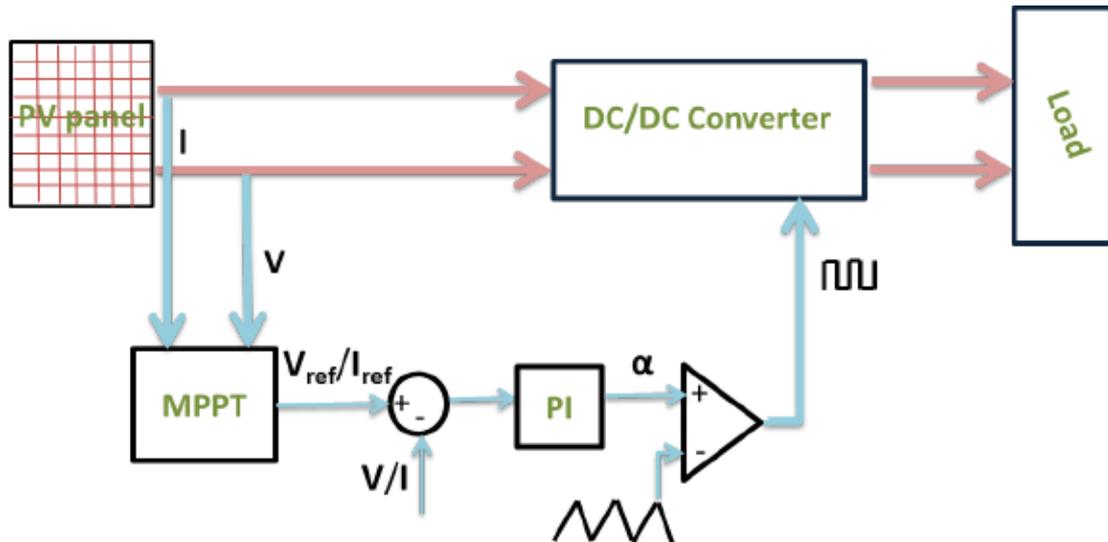


Figure I. 39 Contrôleur MPPT basé sur le courant ou la tension [52].

### I.9.2 Système MPPT basé sur le contrôle du cycle de service

Ce type est défini comme le système de contrôle direct MPPT ; le contrôleur est illustré à la figure I.40 Le bloc PI n'est pas utilisé et le rapport cyclique est calculé directement par le contrôleur. Les avantages de cette solution sont :

- La conception du MPPT devient simple
- Le temps de calcul est réduit.
- Aucun effort de réglage n'est nécessaire pour les gains PI.

Par conséquent, cette configuration nous offre un contrôleur MPPT avec des résultats optimaux [21].

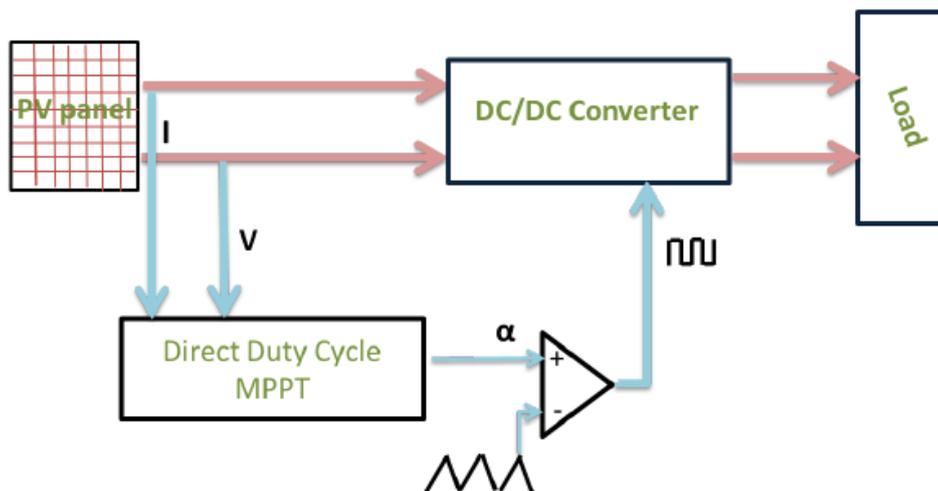


Figure I. 40 Un système MPPT typique basé sur le cycle de service direct [52].

### **I.9.3 Aperçu sur les différentes techniques de MPPT**

Pour une meilleure compréhension des différentes approches utilisées pour le MPPT, les différentes techniques sont classées en trois groupes. Le premier groupe, qui comprend les méthodes les plus populaires ; elles sont basées sur des observations spécifiques en appliquant un signal de contrôle au convertisseur de puissance. Cette méthode est également connu sous le nom de MPPT conventionnels et de techniques de contrôle directes, qui incluent les méthodes Perturbe and Observe (P&O), la méthode Hill Climbing (HC) et la méthode Incrémental Conductance (INC). Le deuxième groupe est constitué par les MPPT qui exploitent les caractéristiques du panneau PV nommé techniques de contrôle indirect. Le dernier groupe comprend des techniques plus récentes, qui sont basées sur des approches d'informatique douce. Il s'agit du contrôleur logique flou (FLC), du réseau neural artificiel (ANN) et l'optimisation par essaims de particules (PSO) qui est l'un des algorithmes évolutionnaires (EA) [53]. Dans cette étude on a besoin de travailler juste avec le groupe 1 technique de contrôle direct.

#### **I.9.3 .1 La méthode Perturb et Observe (P&O)**

En raison de la simplicité de l'algorithme, la méthode Perturbe et Observe (P&O) est la plus utilisée.

Le principe de ce fonctionnement est présenté par l'organigramme de la figure I.41 Elle fonctionne en introduisant une perturbation (décalage) dans la tension ou le courant du panneau. Par conséquence, le changement de la puissance de fonctionnement est observé à l'aide des échantillons de tension ( $V(k)$ ) et de courant ( $I(k)$ ) [22].

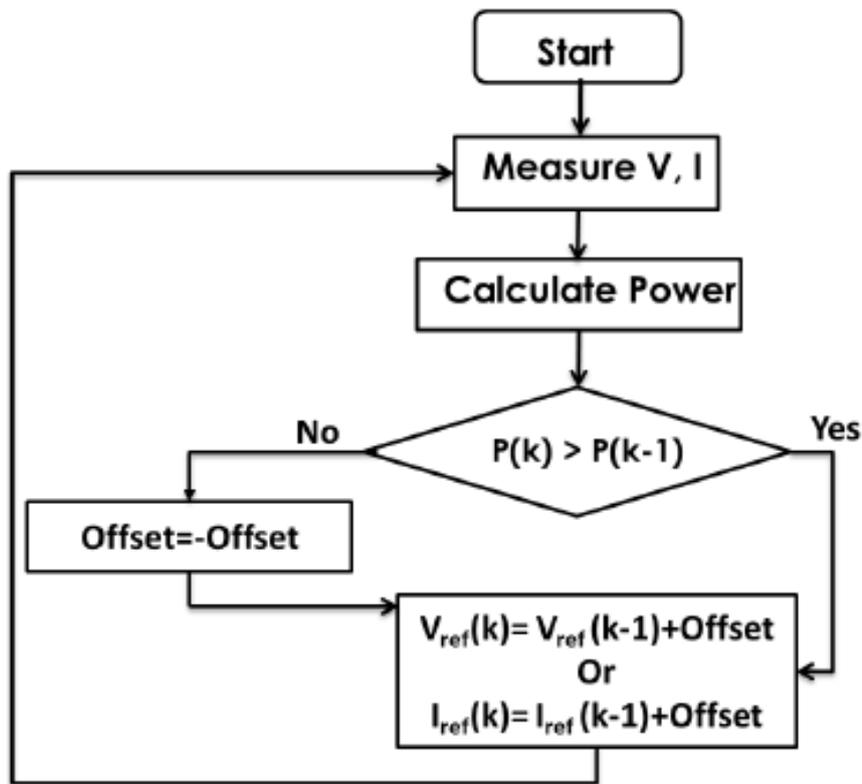


Figure I. 41 Organigramme de la méthode conventionnelle Perturb and Observe (P&O)

[20]

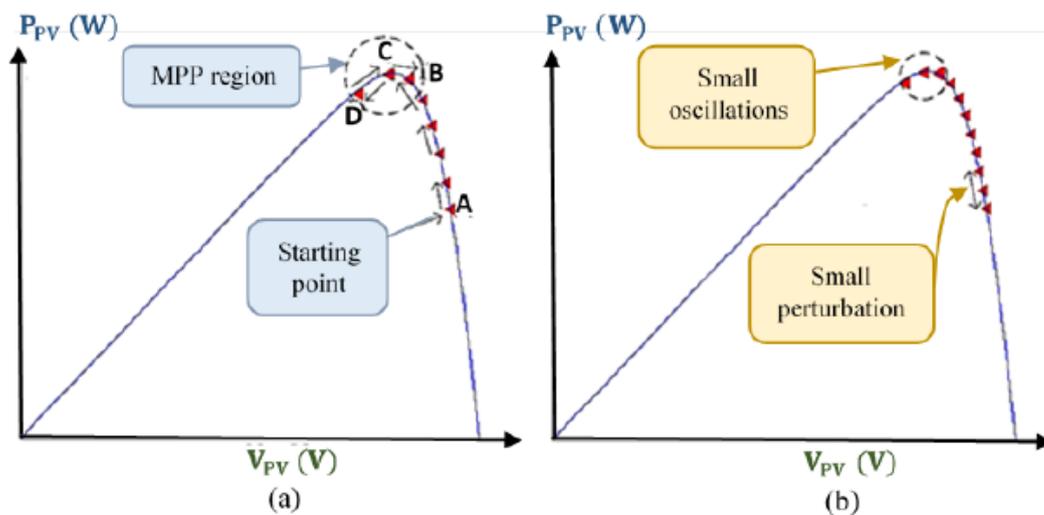
L'augmentation de la puissance de fonctionnement signifie que le système se rapproche de la MPP. Par conséquent, lors du cycle d'échantillonnage suivant, la direction (pente) de la perturbation est maintenue et la tension/courant de référence est encore augmentée d'une quantité de "décalage". Inversement, lorsque la puissance diminue, la valeur de référence est réduite en changeant le signe de la pente [22].

La quantité de valeur de perturbation "décalée" dépend de la nature de l'algorithme : elle peut être constante ou variable. À ce sujet, deux autres groupes de méthodes de P&O sont signalés dans la littérature, à savoir les méthodes de P&O à pas fixe et les méthodes de P&O à pas adaptatif [22].

**a. P&O à échelon fixe :**

Dans cette méthode, une taille de pas fixe est utilisée pour générer un signal de référence pour la boucle de commande PI, comme le montre dans figure I.42 Le signal perturbateur est

soit la tension PV de référence, soit le courant. La figure I.42 (a) montre le mouvement de la puissance de fonctionnement dans le processus MPPT. En partant du point A, la puissance de fonctionnement augmente progressivement avec une valeur fixe de 'offset'. Lorsque le point de fonctionnement atteint le point D, le MPPT observe la diminution de la puissance du panneau. Par conséquent, la pente de l'offset est modifiée et la tension de référence augmente du point D au point C pour compenser la perte de puissance du panneau. Cependant, en raison de la même direction du "décalage", la tension de référence est encore augmentée jusqu'à ce qu'une diminution de la puissance soit détectée au point B. Une fois encore, la valeur de référence sera modifiée en fonction du "décalage". Par conséquent, la puissance de fonctionnement oscille continuellement entre D et B. Le pas de perturbation "offset" est sélectionnée par le concepteur du système, généralement par une approche d'essai. Par conséquent, la solution fournie par cette méthode dépend du système et donc n'est pas générique. On peut également observer sur la figure I.42(a) que l'oscillation dans la région MPP, représentée par le cercle en pointillé, dépend totalement de la valeur du pas. Dans le cas d'un grand pas de perturbation, un suivi plus rapide entraîne des oscillations significatives à l'état d'équilibre (du point D à B). D'autre part, avec une valeur plus petite de 'offset', les oscillations de l'état stationnaire sont réduites, comme le montre le cercle en pointillé de la figure I.42 (b), mais le suivi est nettement plus lent par rapport à la figure I.42(a). Par conséquent, la méthode P&O avec perturbation fixe souffre d'un problème inhérent de compromis entre le suivi et les oscillations [22].



**Figure I. 42 Le mouvement du point de fonctionnement dans l'opération de suivi MPP. (a) Pour une perturbation importante. (b) Pour une petite perturbation [22].**

Avec D représente  $P(k-1)$  et C représente  $P(k)$ , comme exemple.

### b. P&O adaptatif :

Dans l'algorithme P&O à pas fixe, la taille de la perturbation est conçue en fonction de la précision en régime permanent et du temps de réponse du MPPT. Ainsi, le compromis entre le temps de réponse et la précision en régime permanent doit être pris en compte dans la conception correspondante. Pour résoudre ce dilemme, une méthode de P&O variable est généralement utilisée [25].

Dans cette méthode, l'étape de perturbation est ajustée généralement en utilisant la dérivée de la puissance surtension ( $dP/dV$ ) ou du courant ( $dP/dI$ ) d'un panneau PV. Cette approche est totalement adaptative car elle fonctionne sur la base des caractéristiques P-V ou P-I, qui sont toujours présentes, ce qui donne toujours un facteur  $dP/dV$  ou  $dP/dI$  proche de zéro à MPP. Par conséquent, la taille du pas peut être relativement faible lorsque  $dP/dV$  s'approche de zéro et que le panneau fonctionne à proximité de MPP. Ainsi, le P&O adaptatif a une excellente précision en régime permanent [25].

### I.9.3 .2 Conductance incrémentale (INC)

La méthode INC (Incremental Conductance) a été proposée dans (23) pour contourner les inconvénients suivants.

L'INC est basé sur le fait qu'au MPP, la dérivée de ( $dP/dV$ ) est nulle. Mathématiquement, elle peut être écrite comme suit :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = V \frac{dI}{dV} + I = 0 \quad (23)$$

L'équation peut être écrite sous la forme suivante :

$$-\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV} \cong \quad (24)$$

Où  $\Delta V$  et  $\Delta I$  sont les incréments de la tension et du courant PV, respectivement.

Le principe de fonctionnement de l'INC peut donc être dérivé de la courbe P-V, comme le montre la figure I.43, et peut s'écrire comme suit :

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \text{ dans MPP} \quad (25)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \text{ à gauche de MPP} \quad (26)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \text{ à droite de MPP} \quad (27)$$

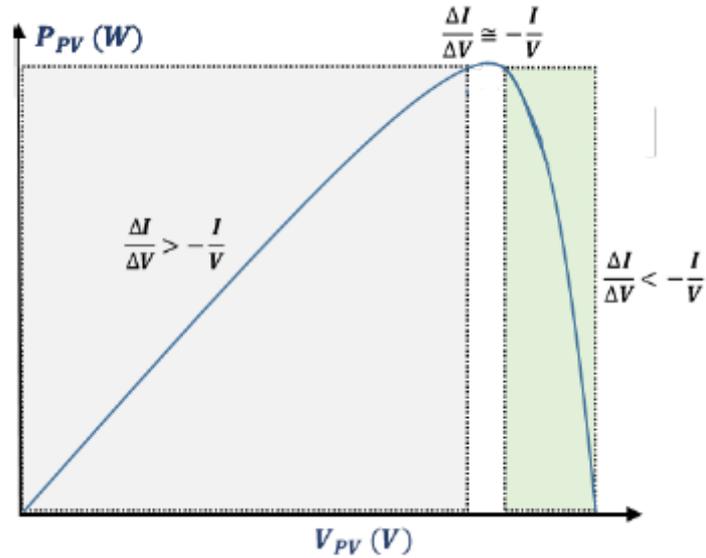


Figure I. 43 Caractéristiques P-V pour la base de la méthode [20].

Ainsi, l'idée de base de la méthode INC est de comparer de manière incrémentielle le rapport entre la dérivée de la conductance et la conductance instantanée [34]. En utilisant les règles énoncées dans les équations (25)-(27), l'organigramme de base de la méthode INC est représenté à la figure I.44

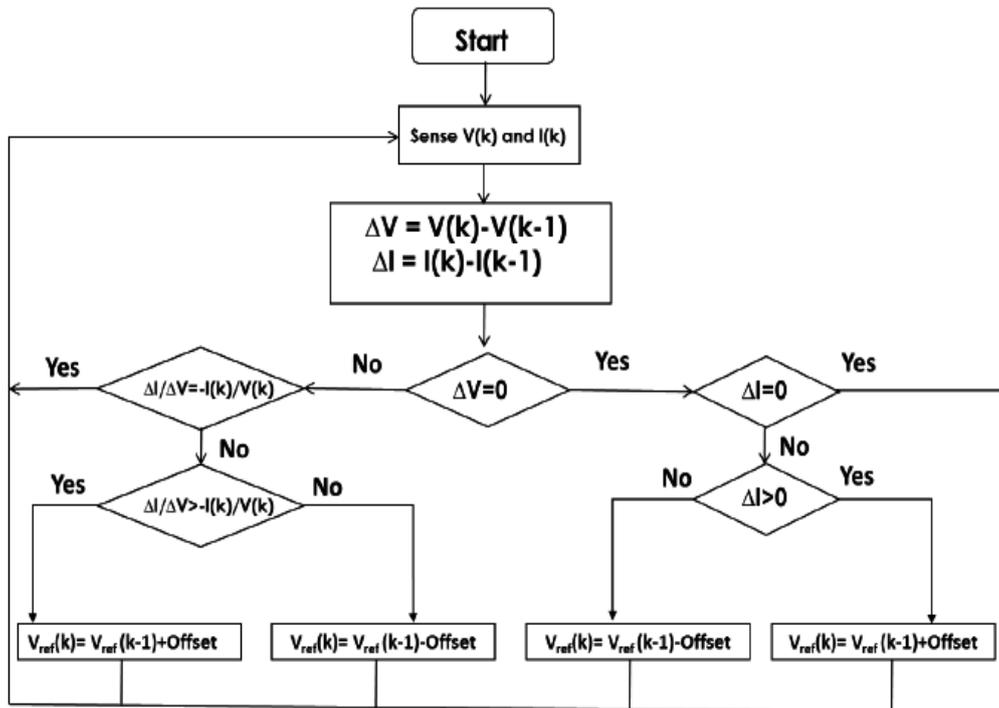


Figure I. 44 : L'organigramme de base de la méthode INC basée sur la tension [22].

On peut remarquer sur la figure I.45 que le signal de référence est basé sur la tension. Puisque les règles des équations (25)-(27) sont dérivées de la courbe P-V, le courant ne peut pas être utilisé comme sortie finale de la méthode INC. Pour utiliser cette méthode par rapport au courant, on peut utiliser la courbe caractéristique P-I, comme le montre la Figure I.41

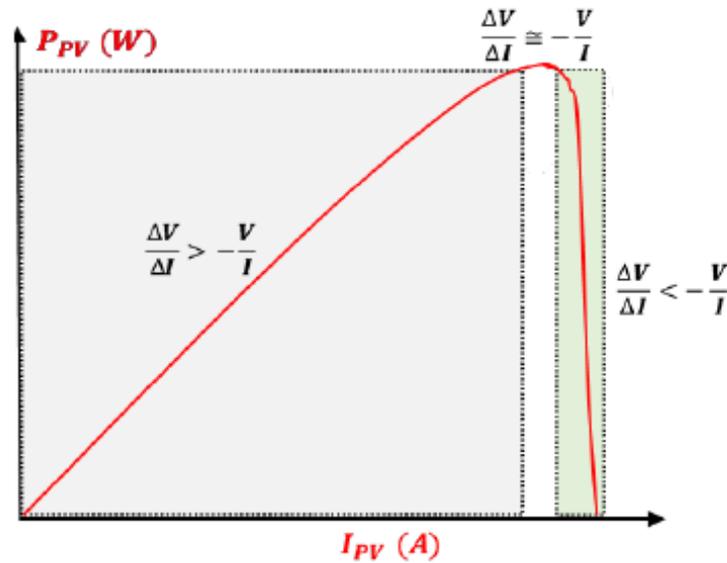


Figure I. 45 La caractéristique P-I pour la méthode INC basée sur le courant [22].

Pour concevoir INC comme un MPPT basé sur le courant, l'équation (23) peut être réécrite comme suit :

$$\frac{dP}{dI} = \frac{d(IV)}{dI} = I \frac{dV}{dI} + V = 0 \quad (28)$$

En conséquence, les règles des équations. (25)-(27) seront transformées par :

$$\frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I} \text{ dans MPP} \quad (29)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \text{ à gauche de MPP} \quad (30)$$

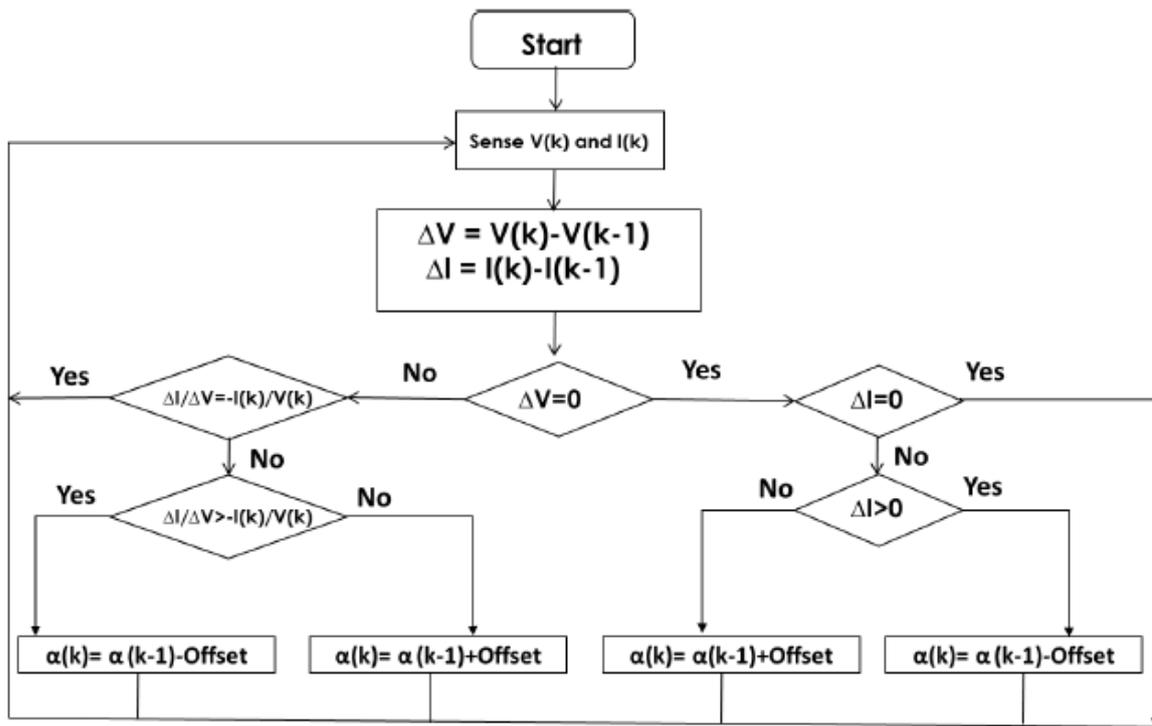
$$\frac{dV}{dI} < -\frac{V}{I} \text{ à droite de MPP} \quad (31)$$

En utilisant les règles définies dans les équations (29)-(31), l'organigramme de la figure I.45 peut être modifié en méthode INC basée sur le courant en inter changeant V avec I,  $\Delta V$  avec  $\Delta I$  et  $V(k)$  avec  $I(k)$ . Par conséquent, l'algorithme sera défini par la résistance incrémentale (ICR) et non INC [22].

Comme pour la méthode P&O, l'INC dépend également de la valeur de perturbation "offset". Une grande valeur de 'offset' résultera en un suivi rapide mais le système peut éventuellement osciller à MPP,  $(\Delta I/\Delta V)$  n'est pas exactement égale à la conductance instantanée  $(I/V)$ . Cependant, une plus petite valeur de "offset" peut surmonter ce problème mais le suivi sera plus lent; donc le Trade-off est toujours présent. De la même manière, deux sous-groupes de la méthode INC peuvent être caractérisé par la valeur fixe et adaptative du "décalage". Ceux-ci ne sont pas discutés séparément en raison du même objectif que celui de l'algorithme P&O [22].

**Cycle de service direct INC**

Dans cette méthode, le rapport cyclique est mis à jour selon le schéma de l'organigramme illustré dans la Figure I.46 Cet algorithme permet d'utiliser une perturbation fixe ou variable. Ce dernier schéma peut être inclus pour obtenir une meilleure vitesse de suivi et de réduire les oscillations en régime permanent [22].



**Figure I. 46 Organigramme de base de l'approche directe du cycle de service basée sur l'INC [22]**

## I.10 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les bases indispensables pour la compréhension du fonctionnement d'un système photovoltaïque. Ce système est constitué de plusieurs éléments à savoir les modules Photovoltaïques, le contrôleur MPPT, et le convertisseur DC/DC.

Les modules Photovoltaïques assurent le processus de conversion du rayonnement solaire en électricité. L'analyse des caractéristiques électriques du module photovoltaïque montre que le module PV présente des caractéristiques  $I(V)$  non linéaires.

De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le module PV débite, il existe un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée vers la charge. Pour optimiser ce transfert, la technique utilisée est d'ajouter un étage d'adaptation.

En effet, pour les applications en régime continu, l'adaptation des PV est réalisée en intégrant des quadripôles d'adaptation entre les générateurs et les charges (résistives) tels que les convertisseurs Boost et les convertisseurs Buck.

Enfin nous avons donné un aperçu sur quelques techniques MPPT les plus répandues. Nous avons présenté trois types de méthodes MPPT qui sont : la méthode classique (INC), la méthode basée sur l'intelligence artificielle (FL) et l'approche (PSO).

# **Chapitre II**

## **Description des différents composants utilisés pour la réalisation du projet**

## II.1 Introduction

Les composants électroniques sont des éléments destinés à être assemblés avec d'autres dispositifs afin d'exécuter une ou plusieurs fonctions électroniques.

Dans ce chapitre, nous présentons les différents composants électroniques nécessaires pour la réalisation de notre projet ainsi que leur principe de fonctionnement.

## II.2 Les composants électroniques utilisés

Les composants électroniques nécessaires pour la réalisation de notre prototype sont représentés dans le tableau suivant

Tableau II. 1 : Composants électroniques utilisés.

Articles	Quantité
Carte ArduinoUno	1
Module INA169	1
IR2104	1
LCD 4X20 avec I2C	1
Transistor IRFP250N	2

## II.3 La carte Arduino

Il existe plusieurs types de carte Arduino à savoir carte Arduino NANO, carte Arduino MEGA et carte Arduino UNO. Cette dernière est utilisée pour la réalisation de notre projet.



Figure II. 2 Les différentes cartes Arduino

## II. 3.2 Aperçu sur la carte Arduino UNO

Arduino UNO est une carte de développement de microcontrôleur populaire basée sur le microcontrôleur 8 bits ATmega328P. Outre le circuit intégré MCU ATmega328P, elle comprend d'autres composants tels qu'un oscillateur à quartz, un système de communication série, un régulateur de tension, ...etc [32].

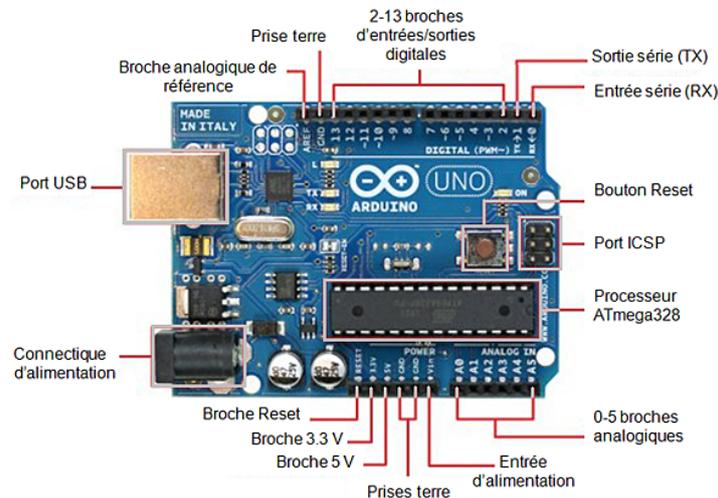


Figure II. 3 Description de la Carte Arduino UNO [33]

## II.3.3 Caractéristiques de l'Arduino UNO

Les caractéristiques de la carte Arduino UNO sont représentées dans le tableau II.2 :

Tableau II. 2: Caractéristiques de l'Arduino Uno

Microcontrôleur	ATMEGA328
Fréquence horloge	16MHZ
Tension de fonctionnement	5V
Mémoire flash	32KB
Mémoire SRAM	2KB
Mémoire EEPROM	1KB
Tension d'alimentation (recommandée)	7-12v
Tension d'alimentation (limites)	6-20V
Interfaces	14 broches d'E/S dont 6PWM 6 entrées analogiques 10 bits
Intensité par E/S	40ma
Dimensions	74x53x15mm

### II.3.4 Microcontrôleur

L'élément principal de la carte Arduino UNO est Le microcontrôleur (ATMEGA328). C'est un circuit intégré ATMEL de la famille AVR 8 bits[29]. Le microcontrôleur ATMEGA328 embarque plusieurs dispositifs complexes dont chacun possède une fonction bien déterminé [34]

En effet, ces éléments sont : le processeur central qui permet l'exécution du programme dans une mémoire Flash, effaçable et réinscriptible de 32Ko et une mémoire(EEPROM) de 1Ko qui permet l'enregistrement des données et le stockage des informations, et une mémoire volatile(RAM) de 2Ko afin de sauvegarder les variables et les données générer via le programme réalisé en langage C [34].

Aussi, la puce (ATMEGA328) est composée de plusieurs éléments auxiliaires tels que les convertisseurs analogiques numériques(ADC) pour analyser et le traiter des signaux analogiques, les broches d'entrées/sorties séries et parallèles ainsi que les Timers [3].

Ces 23 Input/Output broches nous offre la possibilité d'établir une liaison entre le microcontrôleur et les différents dispositifs électroniques [34].

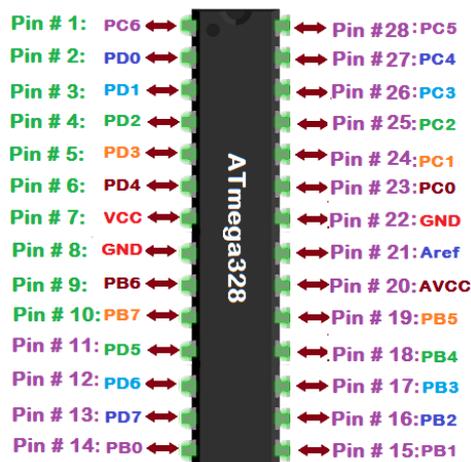


Figure II. 4 Microcontrôleur ATmega 328

## II. 3.5 Configuration du brochage de l'Arduino UNO

### II. 3.5.1 Broches d'Entrées/Sorties numériques

Les broches d'entrées et de sorties numériques (D0 à D13) peuvent être configurées par programmation soit comme des entrées ou bien comme des sorties [36]

Ces entrées/sorties numériques peuvent prendre deux états : HAUT et BAS ; Si vous activez une broche, la tension présentée sera de 5V, par contre si vous désactivez cette broche, la tension sera de 0V. Aussi, il est possible de configurer certaines de ces broches en sortie PWM [36].

Chaque broche numérique peut supporter une intensité maximale de 40mA et possède une résistance interne qui varie entre (20-50 K $\Omega$ ) [36].

Enfin, les deux broches TX et RX (en rouge) représentent respectivement la ligne de transmission série et la ligne de réception série des données. Le rôle de ces lignes est d'établir une communication avec d'autres modules tels que le module wifi, le module Bluetooth, ...etc. [36].

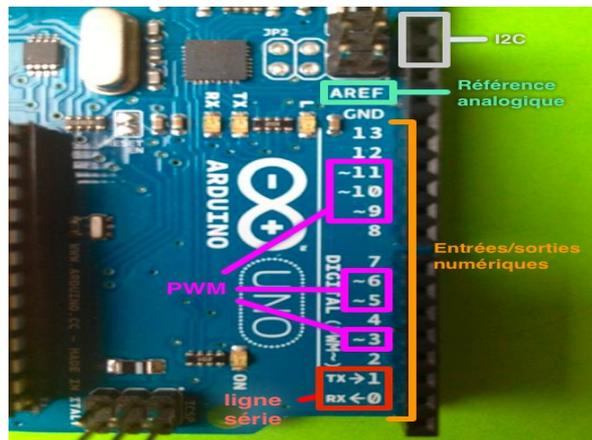


Figure II. 5 Broches d'E/S numériques de l'Arduino UNO[37]

### II. 3.5.2 Broches d'Entrées et sortie analogique

La carte Arduino UNO dispose de 6 broches analogiques (A0 à A5). Les tensions, toujours entre 0 et 5V

Le convertisseur des Arduino à base d'AVR effectue une conversion sur 10 bits, (c'est à dire sur 1024 niveaux soit de 0 à 1023) [36].

Ces broches peuvent également être utilisées comme entrées/sorties numériques.

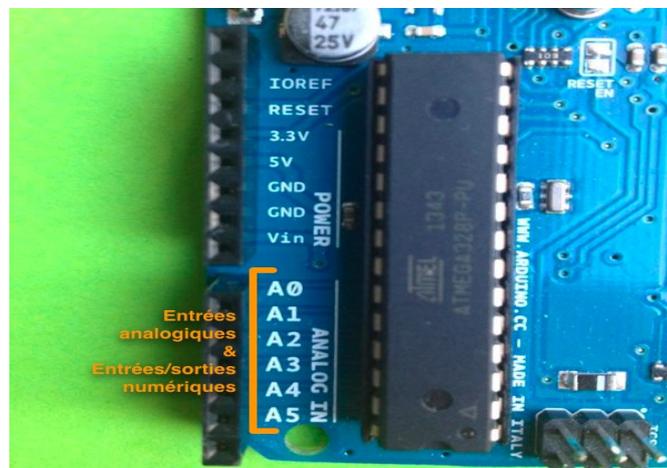


Figure II. 6 Broches d'Entrées/Sorties analogiques de l'Arduino[36].

## II. 3.5 Alimentation de l'Arduino

Nous pouvons alimenter l'Arduino UNO de 3 façons différentes par une source de tension continue externe.

- **Câble USB** : Le moyen le plus simple et le plus facile d'alimenter la carte est l'utilisation d'un câble USB. La connexion USB standard fournit 5V et vous permet de tirer 500mA au total [37].
- **Prise d'alimentation DC** : Il est possible d'utiliser la prise d'alimentation DC comme alimentation. Mais l'adaptateur d'alimentation de la prise doit avoir une tension entre 7V et 12V [37].
- **Broche VIN** : pour alimenter notre carte Arduino via une source externe (exemple: une batterie de 9 volts), il est possible d'utiliser la broche VIN à condition que la tension doit être comprise entre 7V et 12V [37].

## II.3.6 L'environnement de la programmation (Arduino IDE)

L'environnement de développement Arduino IDE est un logiciel utilisé pour interpréter et compiler des codes pour développer des programmes utilisés sur la plateforme Arduino. Il est compatible avec les systèmes d'exploitation Windows et Linux [34]

Cet environnement contient un éditeur de texte pour écrire du code, une console de texte, une zone de message et une barre d'outils pour les fonctions communes [34].

Les programmes Arduino comportent trois parties : [34].

- Déclaration des variables et constantes globales.
- Fonction Setup () : exécutée au démarrage du programme ou lors de l'appui sur le bouton Reset.
- Fonction Loop () : boucle exécutée sans fin (enfin tout pendant que l'Arduino est sous tension).



Figure II. 7 Structure générale de l'Arduino IDE

#### II.4. Le module INA169

Le capteur de courant Ina 169 est un module avec lequel les courants peuvent être mesurés dans une plage allant jusqu'à 5 A

Le module peut fonctionner avec des tensions jusqu'à 60V DC. Avec ce capteur de courant, il est également possible de mesurer de manière fiable de petits courants sans que leurs valeurs mesurées ne s'écartent significativement les unes des autres [39].

Un capteur de courant (INA169) est utilisé pour mesurer l'image du courant du panneau PV [39].

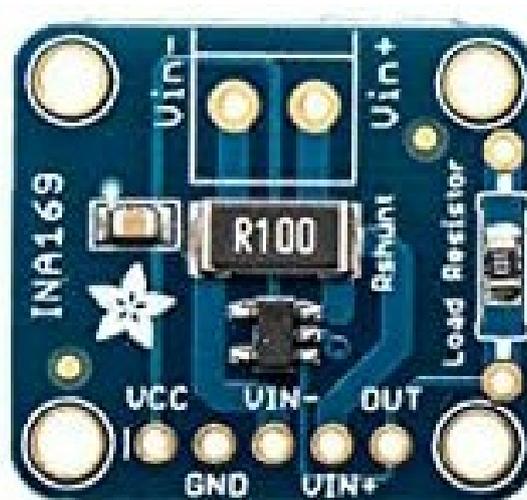


Figure II. 8 : Capteur INA169

### II.4.1 Principe de fonctionnement du capteur INA169

La figure II.9 montre le schéma de base du circuit de l'INA169. Le courant de charge,  $I_S$ , est tiré de l'alimentation,  $V_S$ , à travers la résistance de dérivation,  $R_S$ . La chute de tension dans la résistance de dérivation,  $R_S$ , est forcée à travers  $R_{G1}$  par l'amplificateur op interne, provoquant le passage du courant dans le collecteur de Q1. La résistance externe,  $R_L$ , convertit le courant de sortie en une tension,  $V_{OUT}$ , à la broche OUT [39].

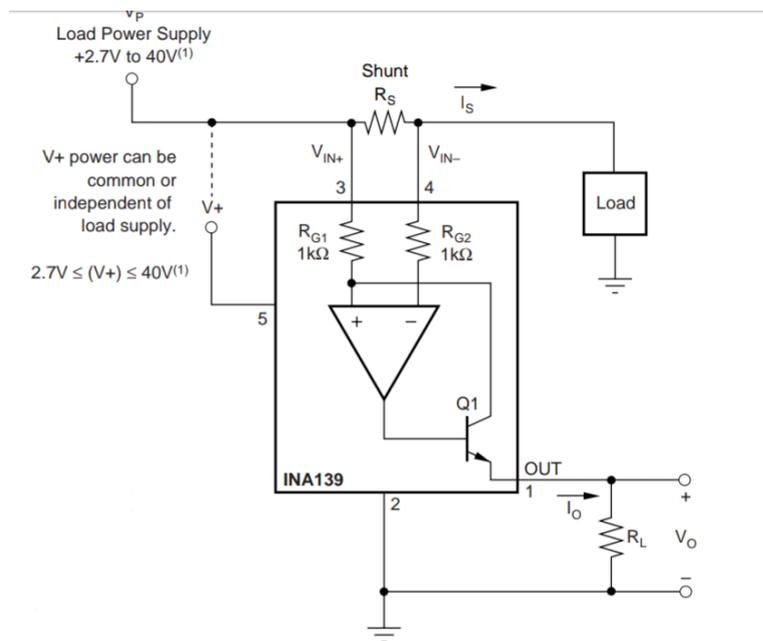


Figure II. 9 Schéma du circuit de capteur INA169 [39]

### II.4.2 Câblage du module INA169 avec Arduino UNO

Les différentes broches du module INA 169 sont représentées dans tableau II.3.

Afin de connecter le capteur INA169 avec la carte Arduino UNO il faut dans un premier temps relier les broches VCC et GND du INA169 aux broches VCC et GND de l'Arduino. Par la suite, il suffit de connecter la sortie analogique du capteur IN169 avec l'entrée Analogique d'Arduino (exemple broche A1).

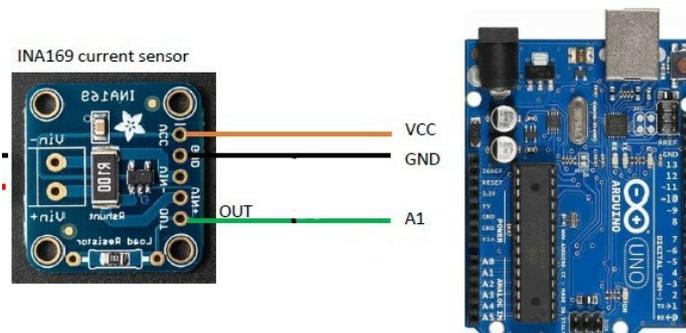


Figure II. 10 branchements d'Arduino avec INA169

Tableau II. 3 branchements INA169 avec l' Arduino

Symbole	Description
VCC	est connecté à l'Arduino VCC (+ 5 V), c'est la puissance alimentation de l'INA169
GND	est connecté à la terre Arduino, c'est le même électrique point comme le côté bas de la source (panneau PV)
VOUT	est connecté à une entrée analogique Arduino, c'est la valeur mesurée de la sortie

## II.5 Écran LCD I2C 20X4

Il s'agit d'un écran LCD 20X4 d'un convertisseur I2C qui permet la connexion à Arduino

En utilisant seulement deux broches par connexion, plus les deux câbles d'alimentation.



Figure II. 11 Structure d'un écran LCD-(20\*4) avec I2C.

### II.5.1 Présentation du matériel de l'écran LCD I2C

#### II.5.1.1 LCD 20X4

Un Afficheurs LCD (Liquide Crystal Display) est un module d'affichage électronique et a un large éventail d'applications. [41].

Dans un module LCD 20×4, il y a quatre rangées d'affichage et dans une rangée vingt caractères peuvent être affichés et dans un affichage quatre-vingts caractères peuvent être

affichés. Ce module à cristaux liquides utilise l'interface parallèle HDD44780 (C'est un contrôleur utilisé pour afficher des affichages de texte monochrome). [42]

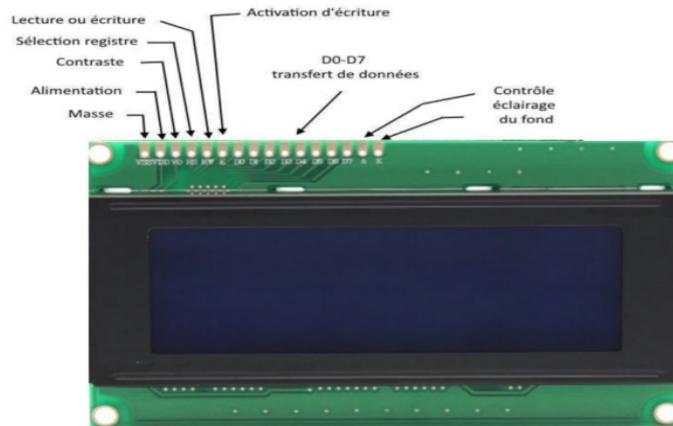


Figure II. 12 Afficheur LCD 20x4[41].

### II.5.1.2 le module PCF8574 i2c PCF8574 i2c

Le module PCF8574 peut être utilisé pour étendre les E/S numériques d'un MCU en utilisant le bus I2C, Le dispositif dispose d'un port d'E/S quasi-bidirectionnel de 8 bits (P0-P7) [43].

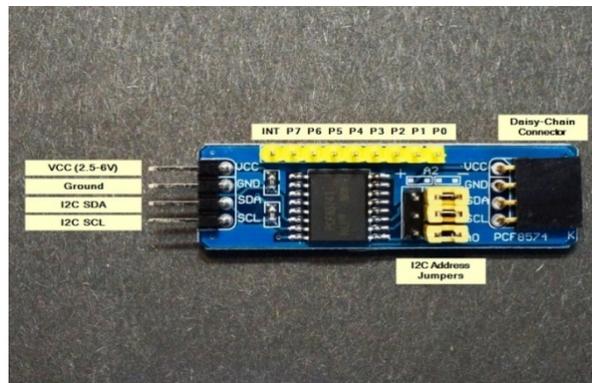


Figure II. 13 Convertisseur i2c

### II.5.2 Câblage d'Arduino UNO avec l'écran LCD et I2C

Toutes les broches de données de l'écran LCD sont connectées au PCF8574 où : RS, RW, E, D4, D5, D6 et D7 sont connectés à P0, P1, P2, P4, P5, P6 et P7 respectivement[43].

Les broches SDA et SCL d'E/S du PCF8574 sont connectées aux broches A4 et A5 de l'Arduino respectivement (broches SDA et SCL de l'Arduino) [43].

La broche VCC à la sortie 5V de l'Arduino UNO, GND à la broche GND de l'Arduino.

## II.6 Le transistor IRFP250N

Le transistor à effet de champ (MOSFET) est un dispositif électronique constitué de trois pattes : la grille, le drain et la source. Il représente l'élément de base dans l'industrie pour la construction de portes logiques [44].

Ce dispositif commandé en tension, car son courant de sortie varie en fonction d'une faible tension appliquée à sa grille [44].

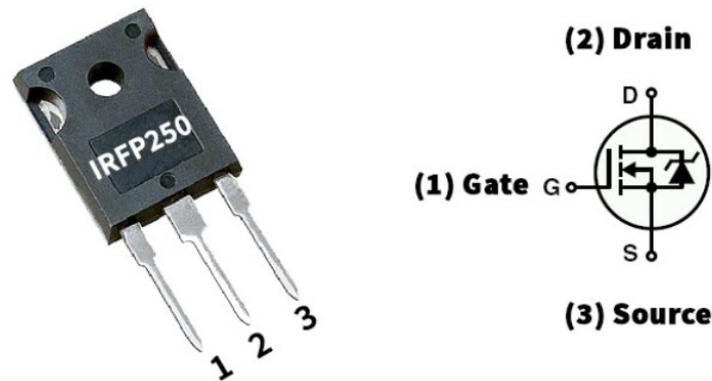


Figure II. 14 IRFP250N [45].

IRFP250N est utilisé pour alimenter des charges fonctionnant sur une tension inférieure à 60V et un courant de 200mA. Les MOSFET sont des commutateurs électroniques de puissance comme les transistors. Mais, ceux-ci ont une tension et un courant nominal plus élevés. [45].

## II.7 IR2104

Les IR2104(S) sont des pilotes de MOSFET et digit de puissance haute tension et haute vitesse avec des canaux de sortie dépendants références côté haut et côté bas[46]



Figure II. 15 Driver IR2104

## II.7.1 Caractéristiques

Le driver de MOSFET IR2104 présenté, entre autres, quelques caractéristiques intéressantes, telles que le courant de charge moyen est de 10 ampères. Cependant, le courant de pointe est de 20 ampères.

Ainsi, la gamme de tension VCC est comprise entre 12V et 36V DC. Par ailleurs, la tension d'alimentation de la Porte logique est de 12-15V DC. Le contenu des signaux d'entrée compatibles est de 3,3V-15V et le brochage de l'IR2104 est basé sur une conception SMD.

L'IR2104 possède une seule entrée PWM. De plus, ce circuit intégré possède une fonction d'entrée d'arrêt. Il possède, ainsi, des bornes à vis pour l'alimentation et la charge. Il y a également un connecteur de tête d'entrée et d'alimentation logique. De plus, il possède une porte logique qui empêche la conduction croisée [46].

## II.7.2 Principe de fonctionnement de l'IR 2104

Les tensions de sortie d'Arduino varient entre 0 et 5V, tandis que la commande de la gâchette nécessite des tensions entre 0 et 10V. Pour cela, nous avons mis en place un driver (IR2104) qui adapte les tensions logiques d'Arduino et permet la commande des MOSFET.

Le driver est utilisé pour l'amplification et le contrôle du signal PWM à la sortie de microcontrôleur (Arduino Uno) à travers les deux Pins numériques « 8 et 9 » pour piloter la grille du MOSFET [47].

L'IR2104 est un driver haute tension et haute vitesse pour la commande des MOSFET et IGBT avec des canaux de sortie dépendants, côté haut et côté bas. L'entrée logique est compatible avec les sorties standard CMOS ou LSTTL, jusqu'à un niveau logique de 3,3V [46].

Les pilotes de sortie comportent un étage de tampon de courant à impulsions élevées conçu pour une conduction transversale minimale du conducteur. Le canal flottant peut être utilisé pour piloter un transistor MOSFET ou IGBT de puissance à canal N dans la configuration côté haut qui fonctionne de 10 à 600 volts [46].

Le schéma interne du IR 2104 est représenté dans la figure II.15

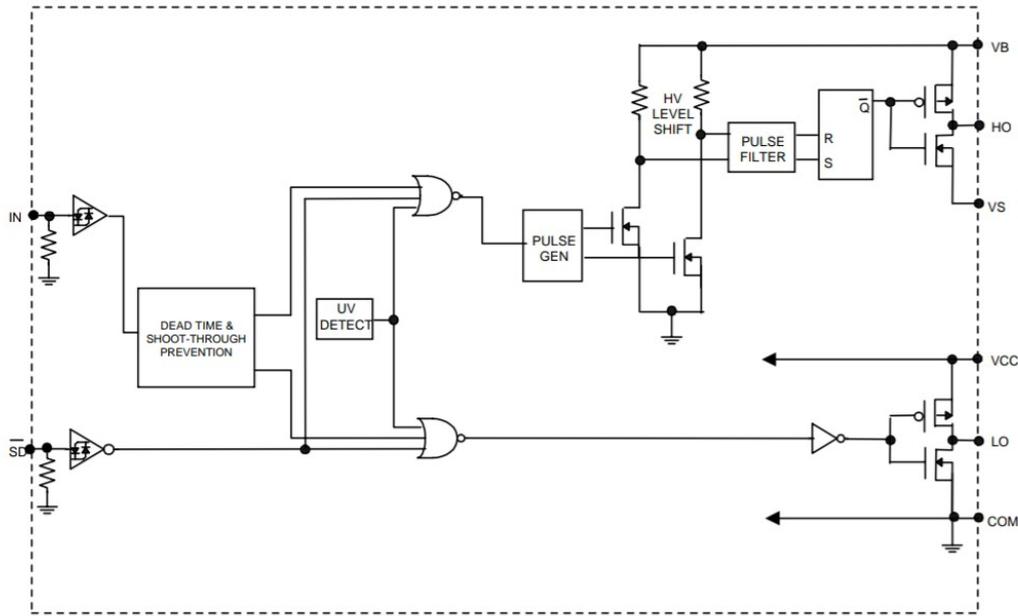


Figure II. 16 Schéma du circuit de Driver IR2104

## II.8. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons donné une description générale des différents éléments qui constituent notre prototype.

Afin de charger la batterie et contrôler l'alimentation, nous avons besoin d'utiliser un contrôleur MPPT.

La première étape consiste à mesurer les valeurs du courant et de la tension en utilisant le module INA 169 et le capteur de tension

Par la suite, ces informations sont envoyées à la carte Arduino Uno pour effectuer les calculs nécessaires et générer un signal PWM. Ce signal PWM est délivré vers le module IR2104 pour l'amplification et le contrôle. Les sorties HO et LO du IR2104 commandent les grilles des deux MOSFET (IRF250) pour contrôler la charge de la batterie.

# **Chapitre III**

## **Simulation et réalisation du circuit**

### III.1 Introduction

L'objectif notre projet est d'étudier et réaliser un contrôleur de charge solaire MPPT basé sur l'utilisation de la carte arduino UNO.

Dans ce chapitre nous allons présenter le principe de fonctionnement de ce circuit et les différents blocs qui composent notre prototype.

Ces différents blocs sont représentés dans la figure III.1



Figure III. 1 Les différents blocs qui consiste notre prototype.

### III.2 La partie Simulation

Afin de mieux comprendre le fonctionnement de notre projet, il est très intéressant de simuler notre circuit électronique.

En effet, la simulation nous permette de résoudre des problèmes concrets de façon sûre et efficace. Quels que soient les secteurs et les disciplines, la modélisation et la simulation nous permet d'avoir une vision claire sur la conception des systèmes complexes. [1]

Il existe plusieurs logiciels de simulation tels que LTSpice, EasyEDA ...etc. Cependant le simulateur le plus utilisé est le logiciel "PROTEUS". Donc, il est intéressant de donner un aperçu sur ce logiciel [25].

#### III.2.1 Présentation du logiciel PROTEUS

Proteus est une suite logicielle destinée à l'électronique. Développé par la société Labcenter Electronics, les logiciels incluent dans Proteus permettent la CAO dans le domaine électronique. Deux logiciels principaux composent cette suite logicielle: ISIS, ARES, PROSPICE et VSM. [55]

### III.2.2 Présentation du module ISIS

Le logiciel ISIS de Proteus est principalement connu pour éditer des schémas électriques.

Par ailleurs, le logiciel permet également de simuler ces schémas ce qui permet de déceler certaines erreurs lors de l'étape de conception. Indirectement, les circuits électriques conçus grâce à ce logiciel peuvent être utilisés dans des documentations car le logiciel permet de contrôler la majorité de l'aspect graphique des circuits. [55]

### III.2.3 Modèle Proteus de panneau PV

Le circuit équivalent du module PV comprend un générateur de courant connecté en parallèle avec une diode qui représente la jonction P-N, ainsi qu'une résistance shunt " $R_{sh}$ " et une résistance série " $R_s$ ".

La modélisation de ce circuit sous Proteus est représentée sur La figure III.2.

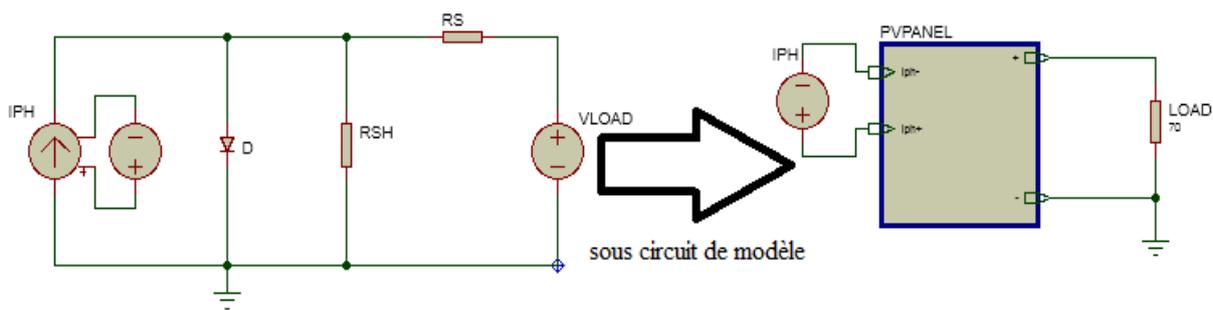


Figure III. 2 Modèle d'un panneau solaire sous ISIS.

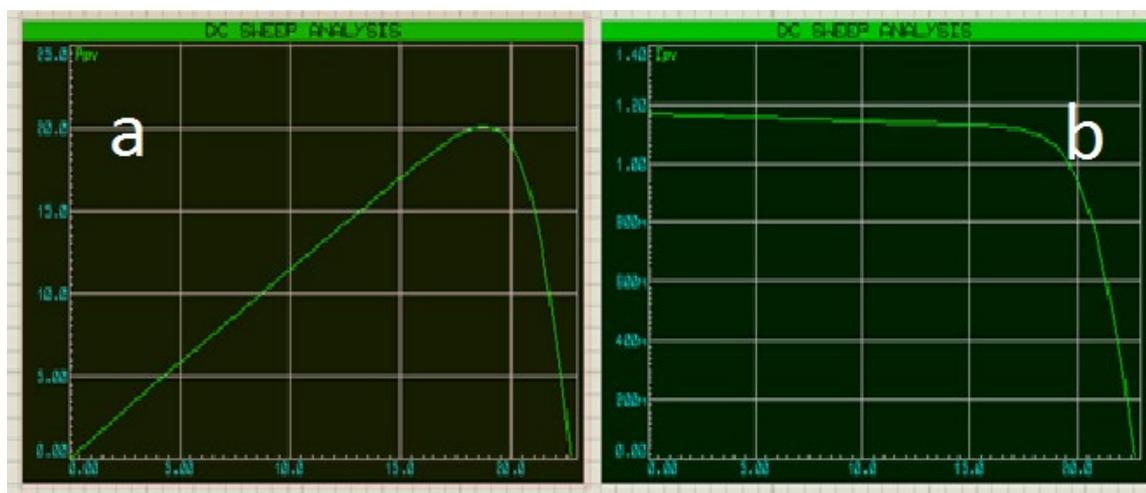


Figure III. 3 Caractéristiques électriques du module (a : puissance =f (courant), b : le courant en fonction de la tension)

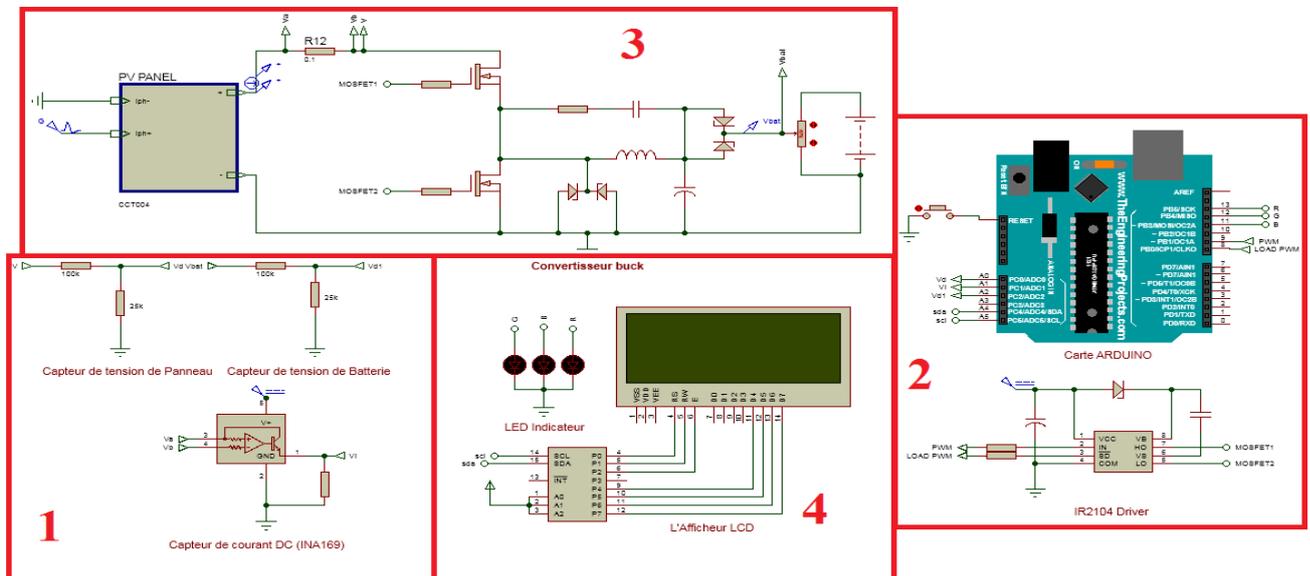
Les caractéristiques électriques de ce modèle de panneau photovoltaïque sont représentées dans la figure III.4.

L'analyse de ces courbes permet d'avoir une tension à MPP ( $V_{max}$ ) de 18.8V, un courant à MPP ( $I_{max}$ ) d'environ 0.9 A, ce qui génère une puissance maximale MPP ( $P_{max}$ ) de 17W.

Ainsi, les valeurs du courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) et de la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) sont 1,01 A et 22,5 V respectivement.

### III.2.4 Schéma général de notre prototype

Le montage de notre projet avec ses différents blocs sous PROTEUS est illustré dans la figure III.4



**Figure III. 4 Schéma général sous Proteus- ISIS**

### III.3 Schémas et méthodologie suivie

#### III.3.1 Description du prototype

Notre projet consiste principalement à réaliser un contrôleur de charge solaire MPPT basé sur carte Arduino.

Pour comprendre le fonctionnement de ce prototype nous avons divisé notre prototype en 4 parties voir (figure III.4) :

- 1) Bloc de mesures.
- 2) Bloc de traitement.
- 3) Bloc de charge.
- 4) Bloc d'affichage.

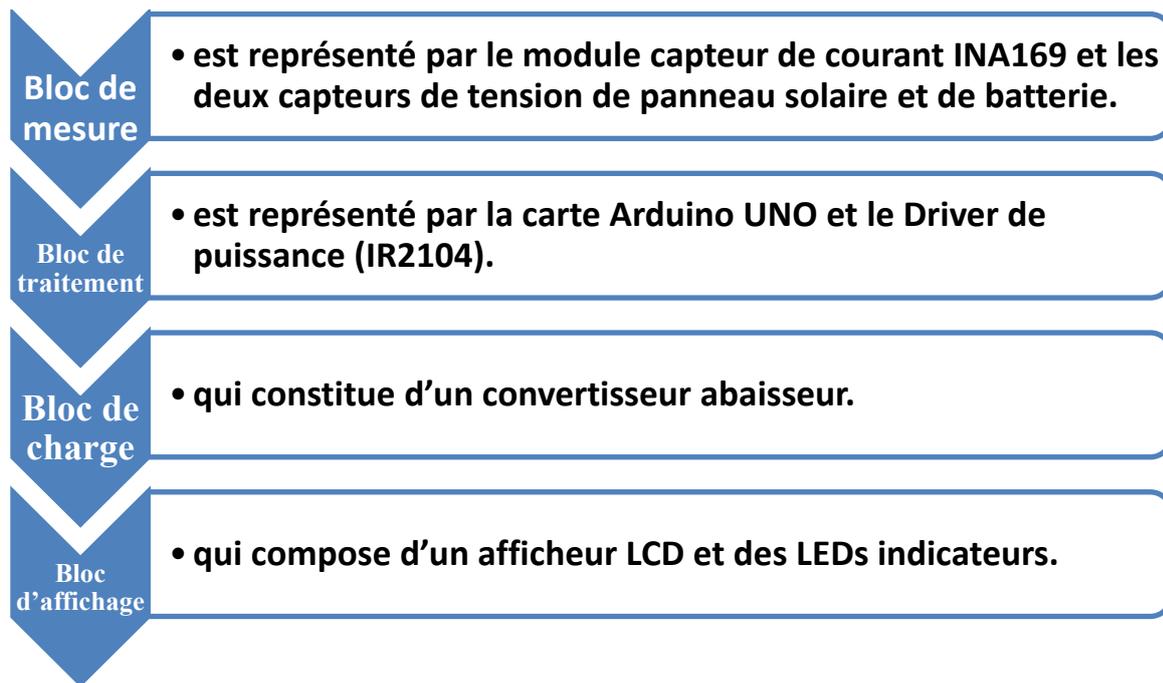


Figure III. 5 Les 4 parties qui consiste notre étude.

### III.3.1.1 Le processus de mesure

La première étape de notre projet est de mesurer le courant et la tension de sortie du panneau solaire.

Pour effectuer ces mesures nous avons utilisé le capteur INA169 pour mesurer le courant et un capteur de tension pour mesurer la tension de sortie du panneau et la tension aux bornes de la batterie.

- **Capteur de tension**

Le capteur de tension est mis en parallèle avec la charge. Ensuite, la sortie de ce capteur est transmise au convertisseur analogique-numérique (CAN) du microcontrôleur ATMEGA de l'Arduino. Ce convertisseur fournit une valeur numérique ( $V_{out1}$ ) qui varie entre 0 et 1023, car cette dernière est codée sur 10 bits. Par conséquent, la résolution de la tension analogique du ce module capteur est de 0.00489 V (5 V/1023), et la tension d'entrée minimale détectée est de 0.02445 V (0.00489 V  $\times$  5). Puisque la plage de tension du module de détection est de [0,25V], le rapport du diviseur de tension est calculé en utilisant l'équation (1).

Par conséquent, la tension de sortie réelle du panneau photovoltaïque peut être déterminée via l'équation (2).

$$Vd = \frac{R2}{(R1 + R2)} \times V \quad (32)$$

$$V = \frac{R2}{(R1 + R2)} \times V_{out1} \times \frac{5}{1023} \quad (33)$$

La figure III.6 montre le schéma du capteur de tension

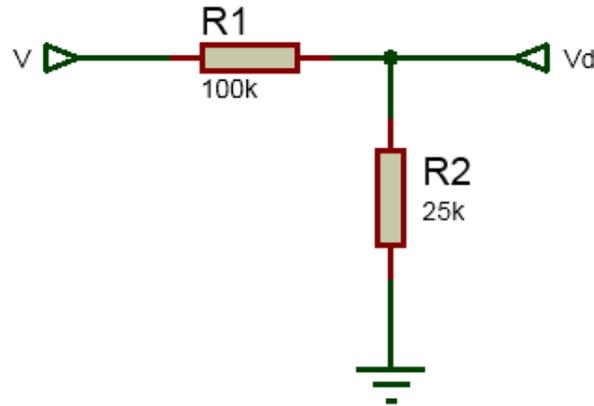


Figure III. 6 Capteur de tension

Pour mesurer la tension aux bornes de la batterie, il suffit d'utiliser la même technique.

- **Capteur de courant :**

Un capteur de courant (INA169) est utilisé afin de mesurer l'image du courant du panneau photovoltaïque. La figure III.7 montre le schéma du capteur de courant INA169.

Le module INA169 mesure la chute de tension aux bornes d'une résistance shunt ( $R_s$ ) placée du côté positif de l'alimentation. L'amplificateur opérationnel à l'intérieur du module INA169 émet en sortie une tension basée sur la différence entre les tensions mesurées  $V_{IN+}$  et  $V_{IN-}$ .

Ensuite, la tension de sortie de l'amplificateur est convertie en un courant par le transistor interne, et ce courant est reconverti en une tension ( $V_o$ ) lorsqu'il est mesuré. Ce courant est reconverti en une tension ( $V_o$ ) lorsqu'il traverse la résistance de charge ( $R_L$ ) vers la masse. Notez que la gamme de  $V_o$  dépend de la tension fournie par VCC (5 V dans notre cas). Par conséquent, le courant mesuré est obtenu par l'équation suivante :

$$I_S = \frac{V_o \times 1000}{R_s \times R_L} \quad (34)$$

Où  $V_o$  est la tension à la sortie de l'INA169.

$R_s$  représente la résistance shunt, sa valeur par défaut est de  $0,1 \Omega$ ,

$R_L$  est la résistance de sortie, sa valeur est de  $10 K\Omega$ .

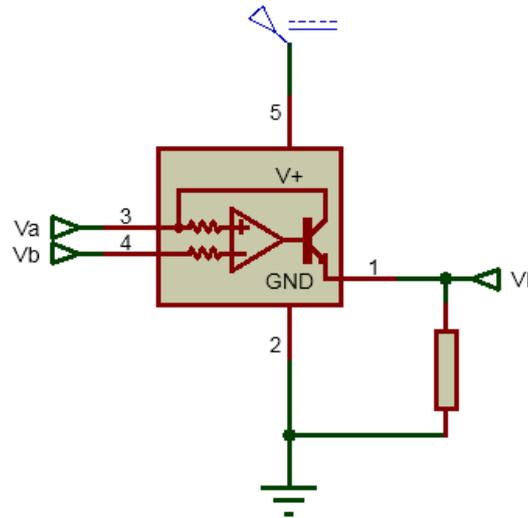


Figure III. 7 Capteur de courant.

Par ailleurs, l'amplificateur mesure la tension aux bornes la résistance shunt ( $R_s$ ) de  $0,1 \Omega$ ,  $1\%/2 \text{ W}$ . Puisque la différence d'entrée maximale de l'amplificateur est de  $500 \text{ mV}$ , cela signifie que l'INA169 peut mesurer jusqu'à  $5 \text{ A}$  en continu.

La sortie est un courant qui est tiré à travers la résistance intégrée de  $10 \text{ K}$  ( $R_L$ ) de sorte que la tension de sortie est de  $1 \text{ V}$  par courant.

La tension de sortie  $V_o$  de INA 169 est transmise vers une broche analogique de l'Arduino. Par la suite, le convertisseur Analogique numérique (ADC) du microcontrôleur convertit cette tension en valeur numérique,  $V_{out2}$  (qui varie entre 0 et 1023). Ce module est placé en série entre l'électrode positive du panneau PV et celle de la charge.

$$I = V_{out2} \times \frac{5}{1023} \quad (35)$$

### III.3.1.2 Processus de traitement

A partir du signal de sortie du panneau photovoltaïque, la carte Arduino UNO fournira un signal PWM dépend d'un rapport cyclique variable. Ce dernier est calculé par un résultat de comparaison de tension de panneau solaire avec la tension de la batterie. L'algorithme de commande utilisé est P&O. Le signal PWM permet de commander les grilles du MOSFETs du convertisseur Buck du bloc de charge avec le driver de puissance IR2104.

La figure III.9 représente le bloc de traitement de notre projet sous Proteus.

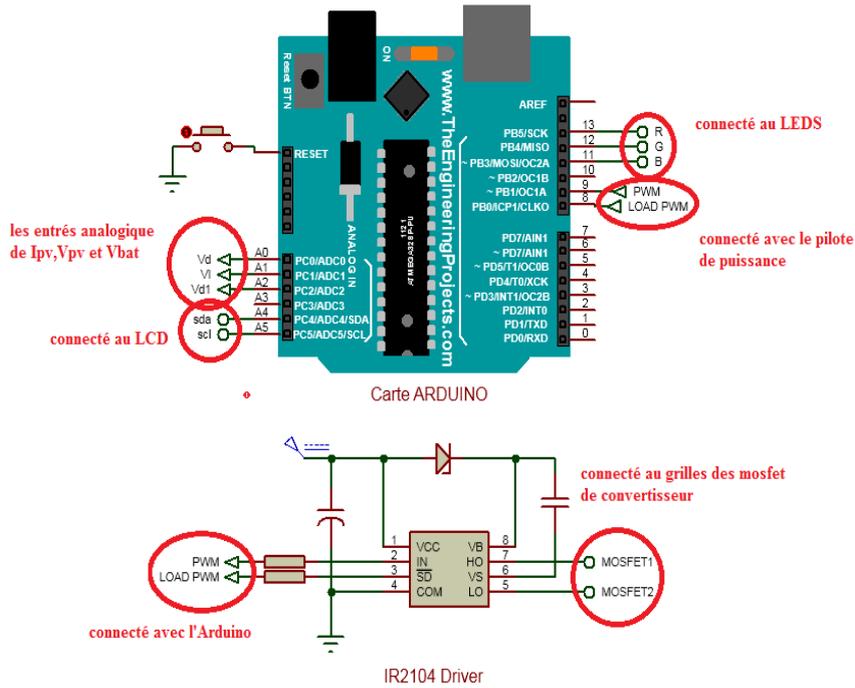


Figure III. 8 Bloc de traitement (L'Arduino avec le pilote IR2104

Le processus de traitement de notre circuit basé sur l'organigramme suivant :

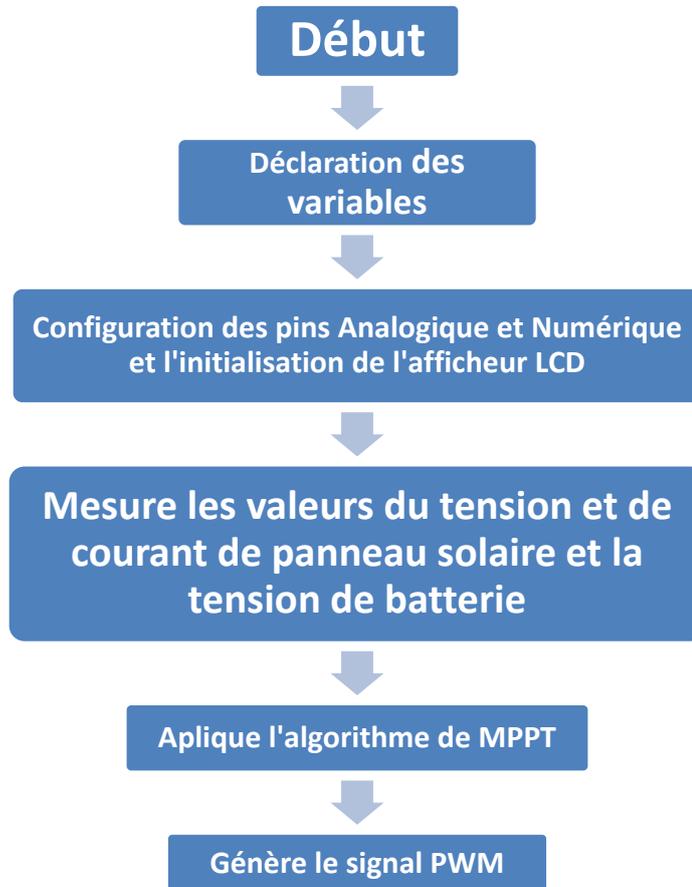


Figure III. 9 L'organigramme du programme principal

### III.3.1.3 Processus de charge

Comme c'est déjà mentionné dans le chapitre 1, l'objectif est de réaliser un chargeur solaire de batterie. Pour cela, nous avons utilisé un générateur de tension qui délivre une tension de circuit ouvert  $V_{co}=25\text{ V}$  et un courant  $I_{cc}=0.5\text{ A}$  (pour représenter le panneau photovoltaïque) destiné à charger une batterie de 12 Volts. Donc le système nous impose d'utiliser un convertisseur de type abaisseur pour diminuer la tension délivrée par le panneau pour avoir une tension plus adaptée avec la sortie (batterie). Cependant le bon fonctionnement de chargeur de batterie dépend du hacheur série puisque ce dernier représente l'utilité du MPPT.

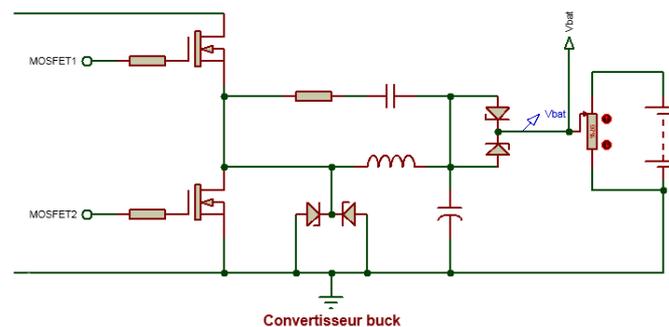


Figure III. 10 Convertisseur abaisseur de notre prototype sous ISIS.

Un signal PWM est délivré vers le module IR2104 pour l'amplification et le contrôle. Les sorties HO et LO du IR2104 commandent les grilles des deux MOSFET (IRF250) pour contrôler la charge de la batterie.

### III.3.1.4 Bloc d'affichage

Ce dernier bloc contient deux types d'affichages :

- Le premier type est réservé pour l'affichage des caractéristiques de panneau PV, le courant de batterie et son état de charge ainsi que le rapport cyclique du signal PWM. Pour cela on a utilisé un afficheur LCD connecté avec le module I2C.
- Le deuxième type est constitué de trois diodes électroluminescentes (LEDs). Ces indicateurs permettent d'afficher les différentes valeurs ainsi que les états de chargement de la batterie.

Le processus d'affichage avec LCD et les LEDs est donné dans la figure III.11.

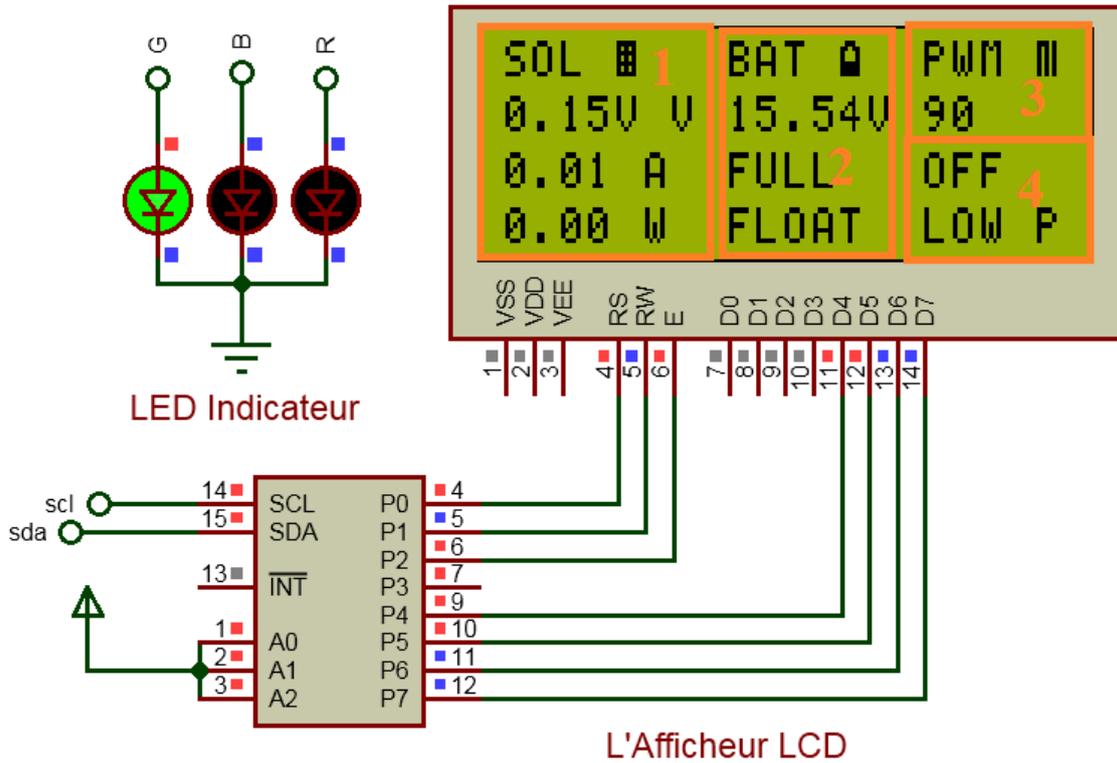


Figure III. 11 Le bloc d'affichage

Avec les informations affichées dans l'écran LCD sont respectivement

- (1) représente les grandeurs électrique généré par le panneau (tension, courant, puissance).
- (2) représente l'état de charge de batterie et sa tension.
- (3) représente la valeur de rapport cyclique de signal PWM.
- (4) représente l'état de panneau solaire.

### III.3.2 Le fonctionnement de programme

L'organigramme de La figure III.12 explique les étapes nécessaires pour charger la batterie.

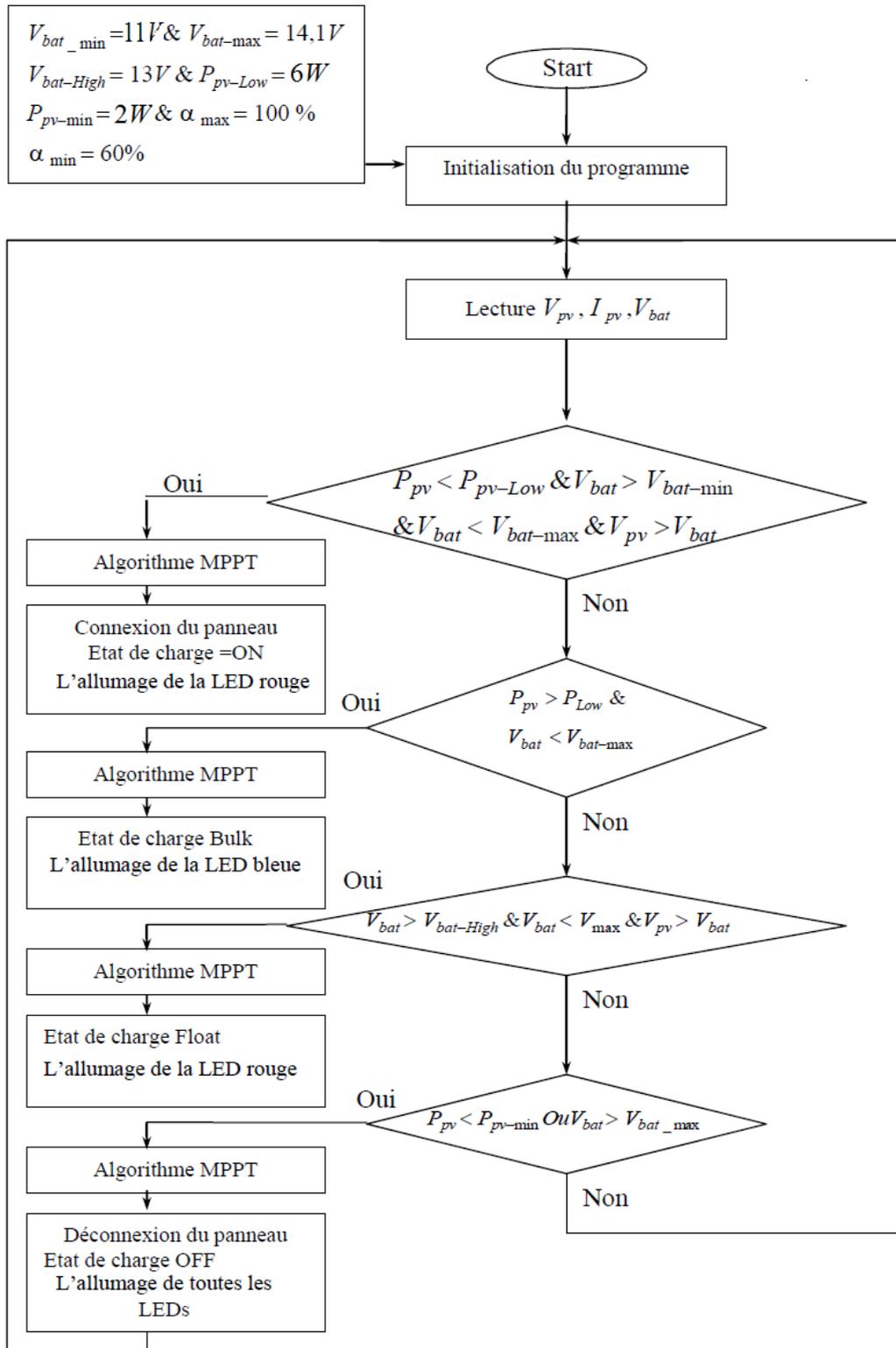


Figure III. 12 Organigramme générale du chargeur de batterie

Le programme commence par une initialisation où il y aura une déclaration de valeurs des éléments pour le démarrage (l'état des LEDs, l'état du driver MOSFET, l'état d'affichage LCD, le temps d'activation de l'interruption Timer1, et quelques variables globales...etc.). Après le démarrage, le programme commence à faire des mesures de la tension du panneau solaire et de la batterie sans oublier la mesure du courant du panneau. Le programme entre ensuite dans une boucle de comparaison pour entrer dans un état de charge.

### Les états de charge de batterie

Pour lancer les différents processus, la première étape consiste à déterminer à quel état se trouve l'entrée (source) et la sortie (batterie) du système.

Il y a quatre états de charge : off, on, bulk et float.

- **État Off**

C'est l'état dans lequel ( $P_{pv} < P_{pv\_min} \approx 2W$ ).

Le chargeur entre dans cet état lorsqu'il fait nuit et qu'il n'y a plus d'énergie générée par le panneau solaire. Les MOSFETs sont désactivés dans cet état afin d'éviter que l'énergie de la batterie ne retourne pas dans le panneau solaire. Lorsque l'état Off est entré pour la première fois, tout ce qu'il fait est de décrémenter le nombre d'itérations de l'état Off 9 fois. Ceci est fait parce que si la batterie est déconnectée (ou si le fusible de la batterie est grillé), il faut un moment avant que la tension de la batterie change suffisamment pour que nous puissions dire que la batterie n'est plus connectée. Ce nombre d'itérations de l'état de chargeur en mode Off donne un peu de temps pour que la tension de la batterie change afin que nous puissions le savoir.

Le signal PWM pour cette phase est illustré dans la figure III.13.

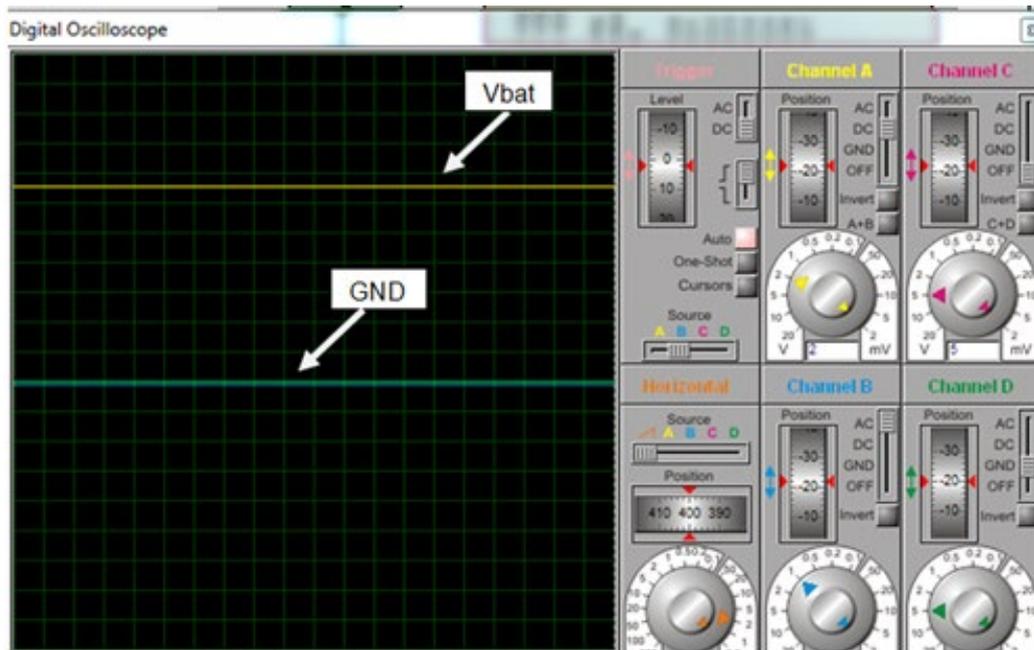


Figure III. 13 Visualisation de signal PWM et la tension de batterie dans l'état «Off»

Le bloc d'affichage de cet état est représenté dans la figure III.14

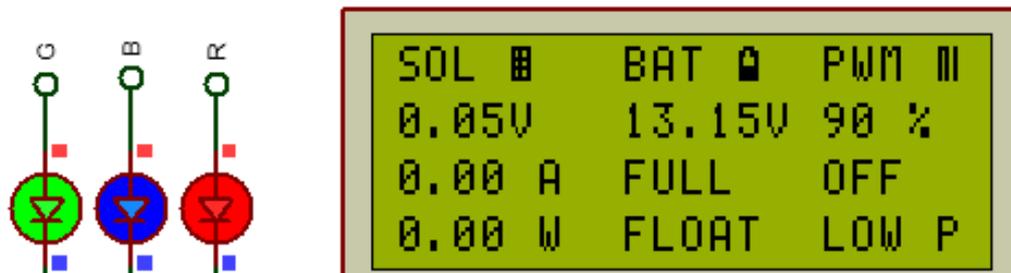


Figure III. 14 L'affichage dans l'état «Off»

- **État On**

Cet état se produit lorsque l'énergie du panneau fournie se situe entre 2W et 6W ( $P_{pv\_min} < P_{pv} < P_{pv\_low}$ ).

Ce mode nécessite un signal PWM avec un rapport cyclique maximal (=100%). ceci nous permet d'optimiser (maximiser) le transfert d'énergie du panneau vers la sortie.

Le signal PWM pour ce mode est illustré dans la figure III.15.

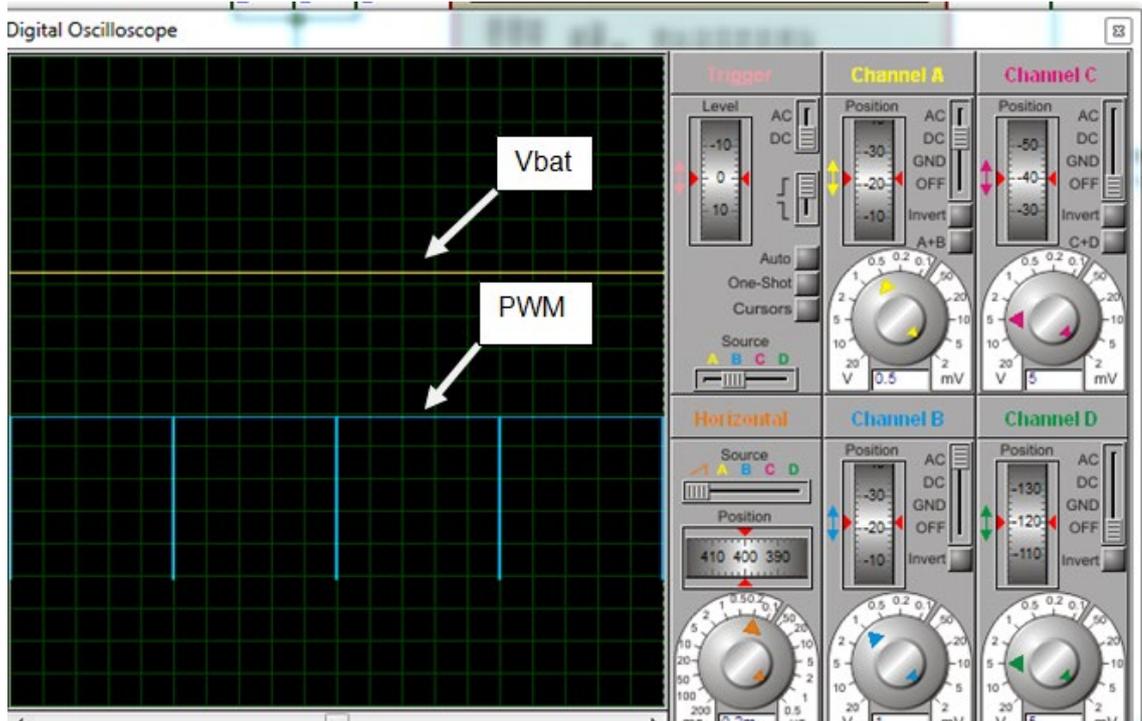


Figure III. 15 Visualisation de signal PWM et la tension de batterie dans l'état «On»

Le bloc d'affichage de cet état est représenté dans la figure III.16.

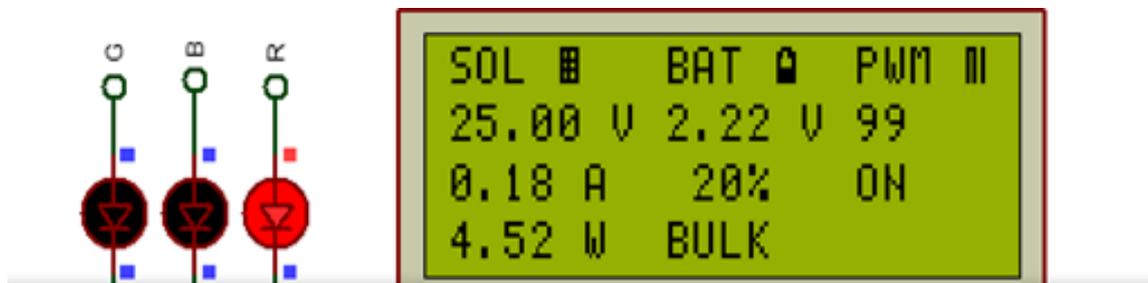


Figure III. 16 L'affichage dans l'état «On»

- **État Bulk**

C'est l'état du charge pour ( $P_{pv} > P_{pv\_low}$ ) et ( $V_{bat} < V_{bat\_max}$ ). Cette phase est primordiale pour le processus de chargement. Dans cet état, l'objectif principal est de faire passer la valeur maximale de courant que les panneaux solaires génèrent pour charger la batterie. Pour se faire, nous utilisons l'algorithme de la méthode P&O (déjà expliqué dans le chapitre 1) pour calculer à chaque fois le PPM. L'exécution de l'algorithme permet de générer un signal PWM avec un rapport cyclique qui varie entre 60% et 99%.

Le signal PWM pour cette phase est illustré dans la figure III.17.

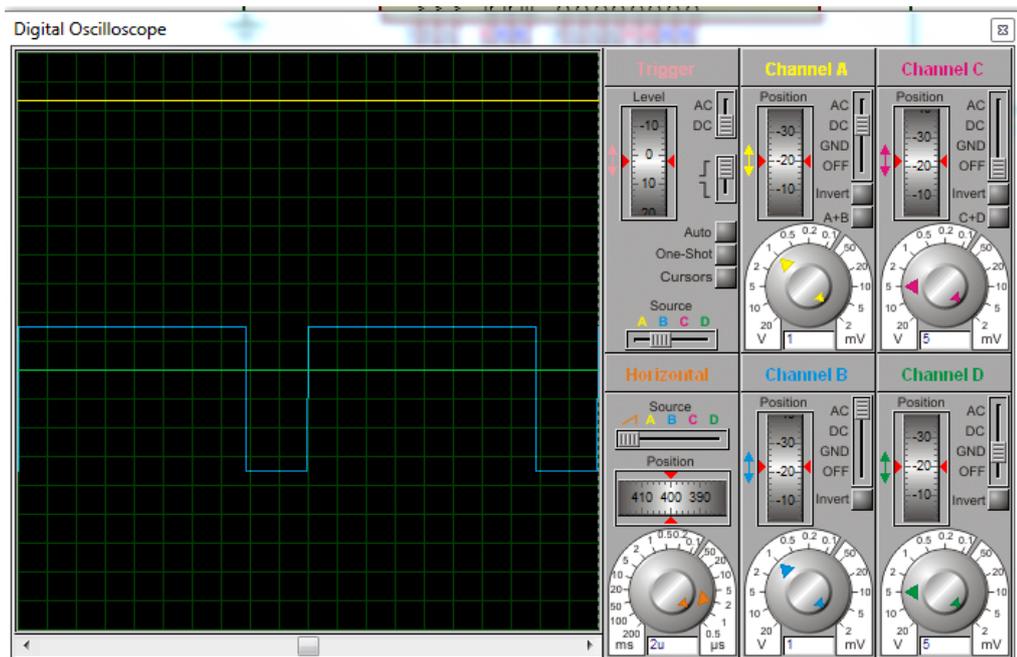


Figure III. 17 Visualisation de signal PWM et la tension de batterie dans l'état «Bulk»

Le bloc d'affichage de ce mode est représenté dans la figure III.18.

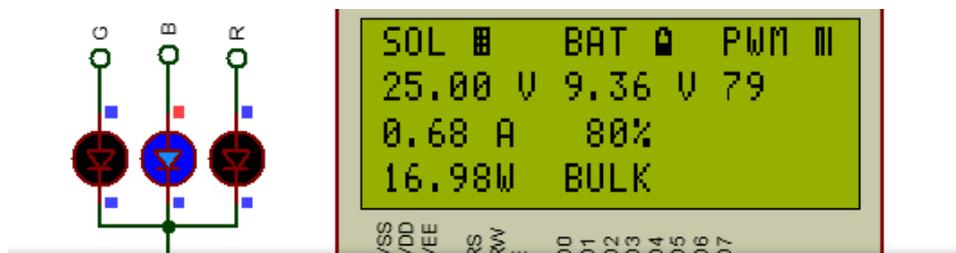


Figure III. 18 L'affichage dans l'état «Bulk»

- **État Float**

Au moment où la batterie se charge, sa tension augmente. Lorsqu'elle atteint la valeur  $V_{bat\_max}$ , le processus de charge s'arrête. Ce mode est appelé "Float". Dans cet état, l'objectif est de maintenir la tension de la batterie au maximum. Pour cela il faut avoir un rapport cyclique de 60%.

Le signal PWM pour cet état est illustré dans la figure III.19.

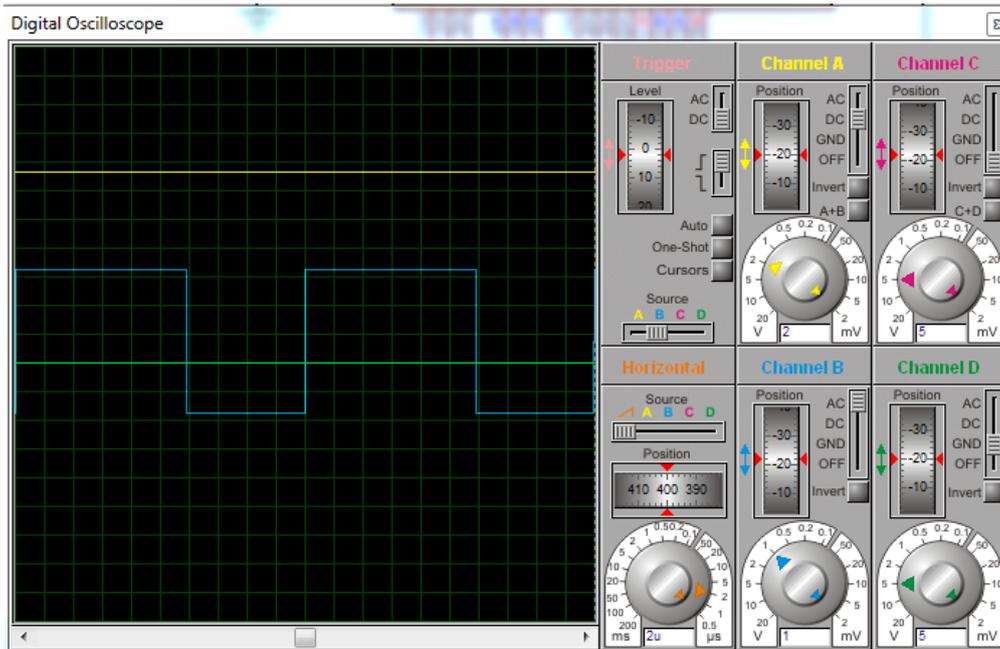


Figure III. 19 Visualisation de signal PWM et la tension de batterie dans l'état «Float»

Le bloc d'affichage de ce mode est représenté dans la figure III.20.

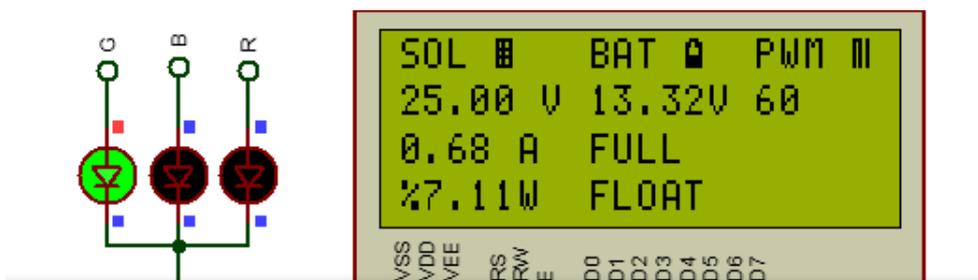


Figure III. 20 L'affichage dans l'état «Float»

### III.4 La partie réalisation

Une fois la partie simulation est achevée, nous passons maintenant à la partie réalisation de notre prototype.

En effet, afin de réaliser le contrôleur MPPT il est nécessaire de réaliser les principaux blocs qui constituent le circuit électronique (voir figure III.21)

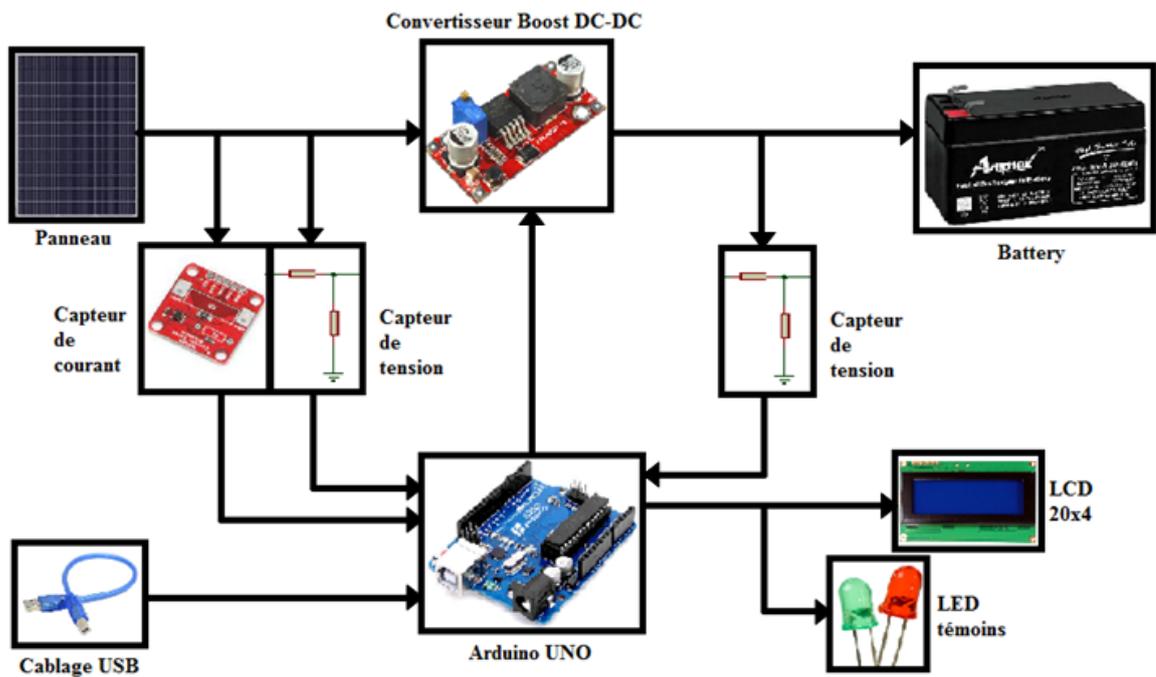


Figure III. 21 Schéma général de contrôleur de charge solaire MPPT

### III.4.1 Les étapes de fonctionnement de notre circuit

La figure III.22 Représente le circuit global de notre réalisation et les différents blocs qui se composent.

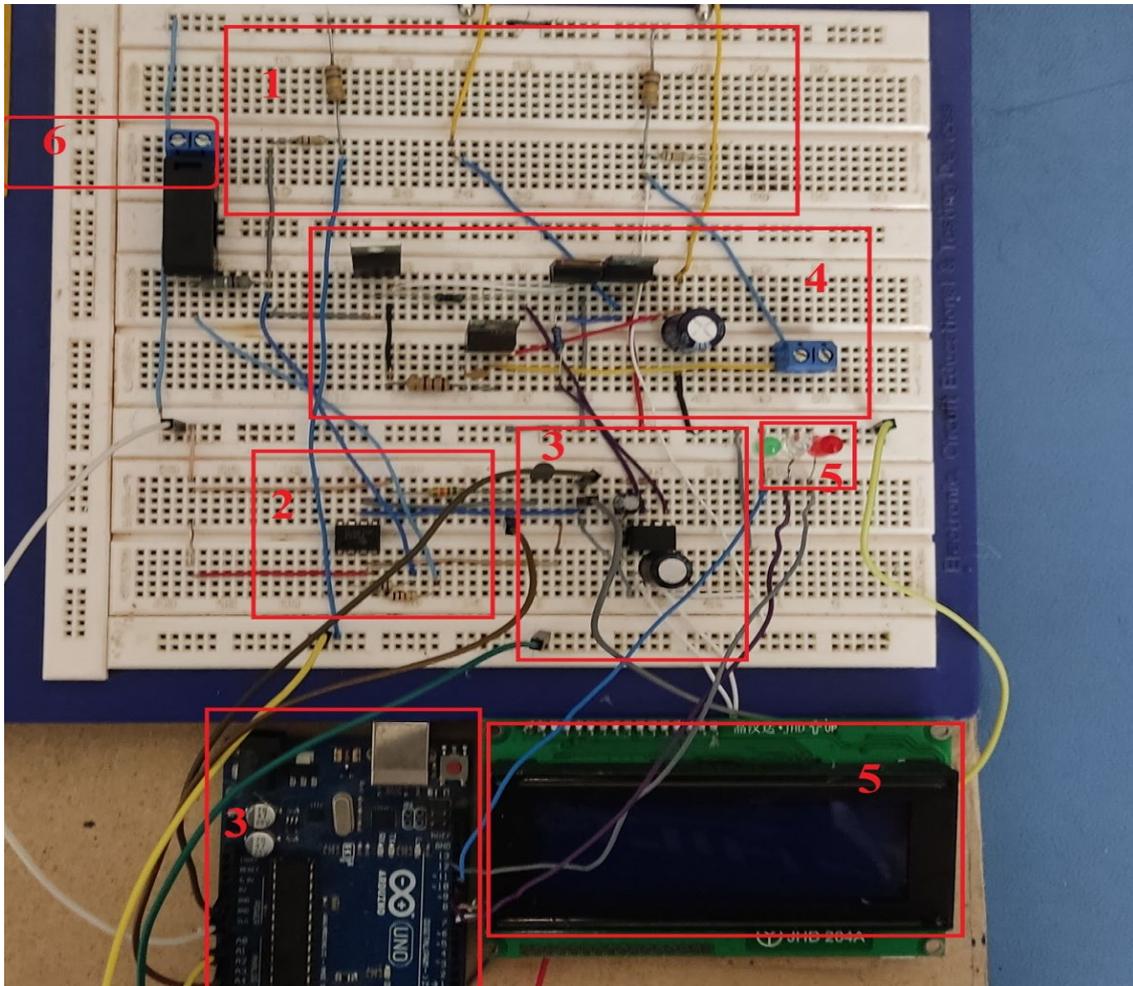


Figure III. 22 Les différents blocs dans notre réalisation.

Avec :

- (1) représente les capteurs de tension.
- (2) représente le capteur de courant.
- (3) représente les blocs de traitement.
- (4) représente le bloc de charge.
- (5) Représente les blocs d'affichage.
- (6) Représente les entrées de panneau solaire.

- **Les étapes de fonctionnement de notre circuit :**

Lors de la connexion des panneaux solaires avec le contrôleur MPPT et en présence de la lumière, ces panneaux commencent à fournir de l'énergie.

Dans nos testes, et afin de remplacer les panneaux PV, nous avons utilisé une source de tension continue qui délivre une tension de 25 V avec un courant de 0.5 A.

La première étape consiste à mesurer le courant et la tension générés par source et la tension aux bornes de la batterie via les capteurs de courant et de tension.

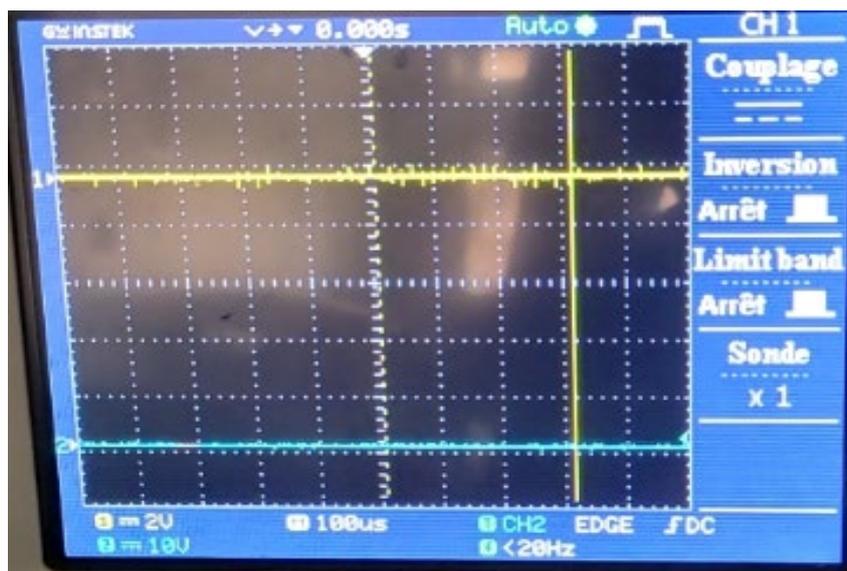
Plusieurs cas sont envisageables :

- S'il la puissance de panneau solaire est très faible ( $P_{pv} < 2W$ ), dans ce cas la batterie ne peut pas se charger car il faut que la puissance minimale soit supérieure à 2W pour démarrer le processus de charge. Par conséquent, l'afficheur LCD affiche le message « OFF » et les trois LEDs s'allument (figure III.23).



**Figure III. 23 Visualisation de résultat de réalisation durant le mode "OFF"**

Dans ce cas l'Arduino ne génère aucun signal PWM et le Pin 9 passe au niveau logique 0.



**Figure III. 24 Visualisation du signal PWM dans le mode "OFF"**

- Lorsque la puissance de panneau est faible ( $2W < P_{pv} < 6W$ ) avec une tension de batterie inférieure à 11.3V. Cette phase nécessite un signal PWM avec un rapport cyclique trop élevé ( $d \approx 100\%$ ). Ceci nous offre la possibilité d'optimiser le transfert d'énergie de la source vers la batterie.

Le signal PWM pour cet état est représenté dans la figure III.25.

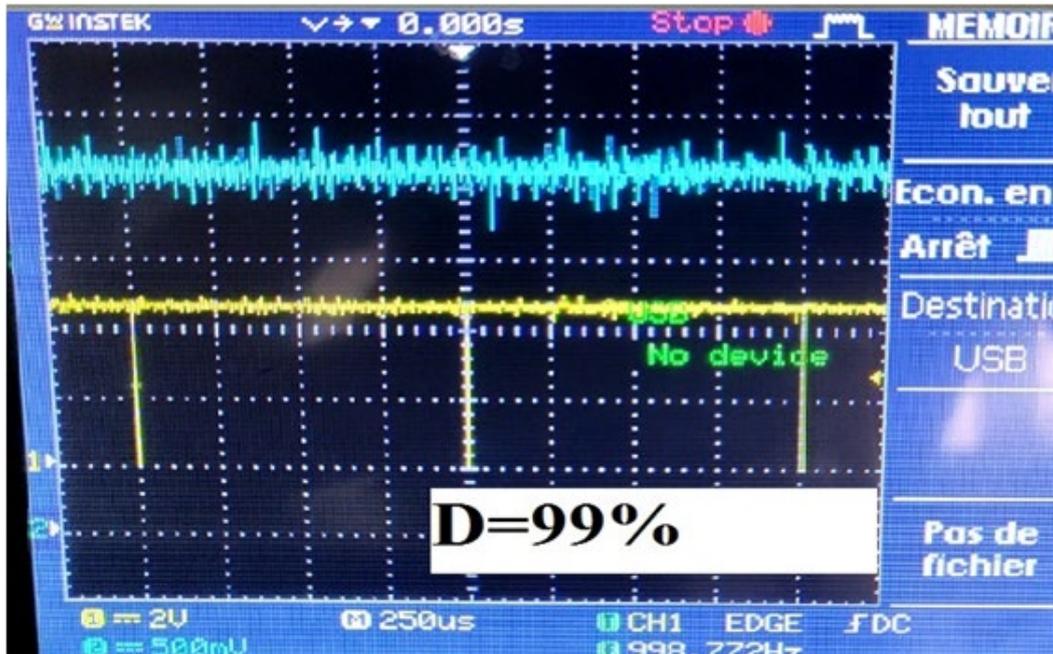


Figure III. 25 Visualisation du signal PWM dans le mode "ON"

Dans cette phase, l'écran LCD affiche "ON" avec un rapport cyclique  $d = 99\%$ , et la LED rouge s'allume (voir figure III.26).



Figure III. 26 Visualisation de LCD dans le mode "ON"

- Lorsque la puissance est suffisante et la tension de batterie est inférieure à 12.7 V, nous passons au mode BULK. Dans ce cas la batterie continue de se charger avec un rapport cyclique varie entre 60% et 100%.

Le signal PWM pour cette phase est illustré dans la figure III.27.

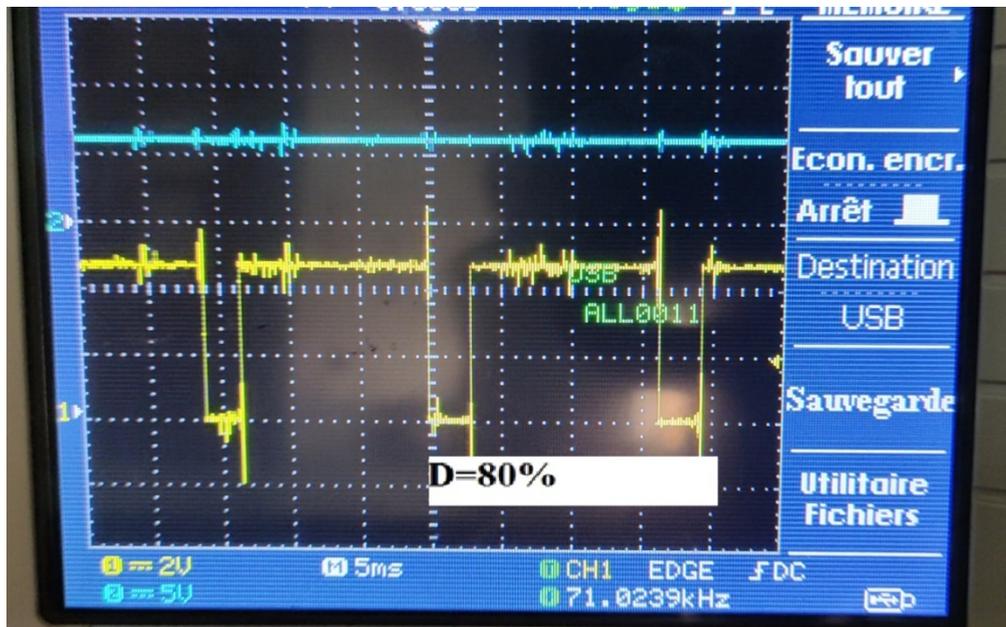


Figure III. 27 Visualisation du signal PWM dans le mode "BULK"

Le pourcentage de chargement en ce mode varie de 0% à 100%. L'écran LCD affiche le message "BULK" et la LED bleu s'allume pour indiquer que la batterie est en cours de chargement (figure III.28).



Figure III. 28 Visualisation de LCD dans le mode "BULK"

- Lorsque la tension de batterie atteinte une valeur de 12.7 V, le mode de charge est "FLOAT". Pour ce mode, le rapport cyclique adéquat est de 60%.  
Le signal PWM pour cet état est représenté dans la figure III.29.

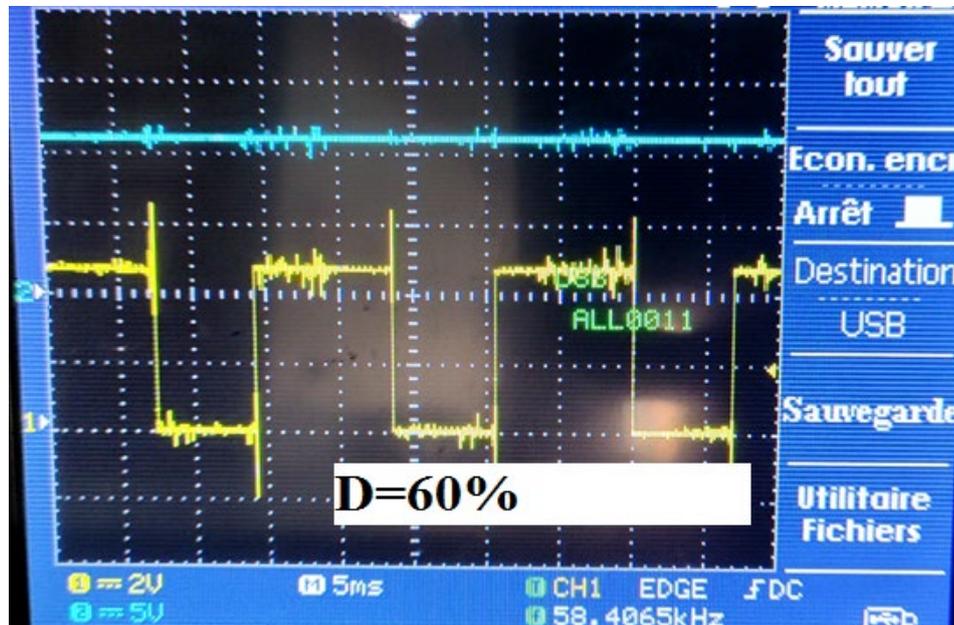


Figure III. 29 Visualisation du signal PWM dans le mode "FLOAT"

Si la tension de la batterie est de 14.1 V, la batterie est complètement chargée. Donc il est important de stopper le processus de charge. Ceci est effectué en basculant la sortie de l'arduino (pin 9) à l'état bas.

Dans cette situation, l'afficheur LCD affiche le message "FLOAT" et indique que la batterie est "full". Pour confirmer le chargement total de la batterie, LED verte s'allume (figure III.30).



Figure III. 30 Visualisation de LCD dans le mode "FLOAT"

Une vue globale de notre prototype réalisée est illustrée dans les figures III.31 et III.32

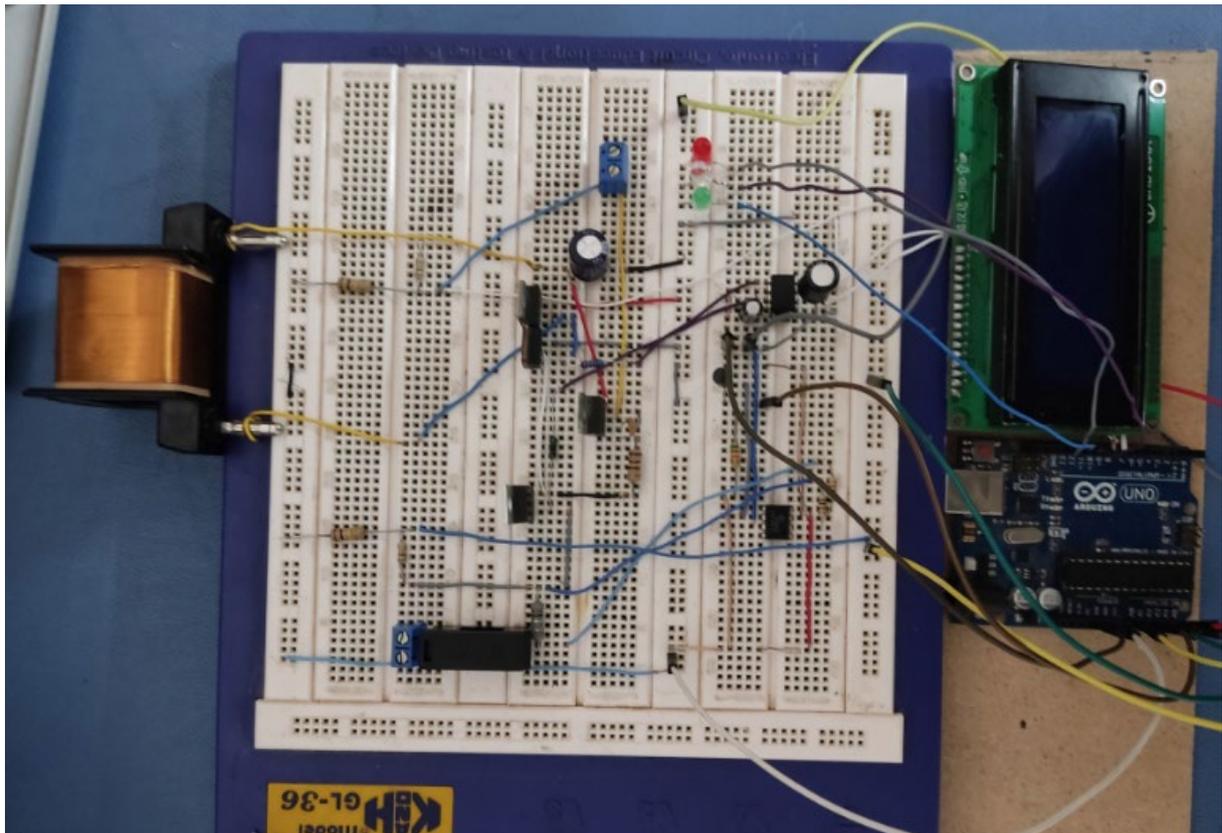


Figure III. 31 vue globale du prototype réalisé



Figure III. 32 Prototype de contrôleur de charge solaire MPPT dans son boîtier

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré les différents blocs qui consistent notre prototype.

Il était important pour nous de passer par la simulation sous PROTEUS, pour une meilleure optimisation.

Ensuite, nous avons réalisé les quatre étages (bloc de mesure, bloc de traitement, bloc de charge et le bloc d'affichage).

Enfin, plusieurs tests ont été effectués afin de valider le bon fonctionnement de notre circuit global.

## Conclusion générale

Le photovoltaïque est devenu une source importante de l'énergie. Cependant, ce système a besoin de plusieurs étapes pour la conversion de la lumière à l'énergie électrique.

L'exploitation de cette énergie électrique nécessite l'intervention de plusieurs éléments tels que le microcontrôleur et le convertisseur DC/DC. Ce dernier joue le rôle d'adaptateur entre la source et la batterie afin d'assurer le transfert de la puissance maximale. Ceci est accompli via le contrôleur MPPT. C'est dans ce contexte que notre projet intervient.

En effet, l'objectif de notre projet était de réaliser un contrôleur de charge solaire MPPT et stocker cette énergie dans une batterie. Le prototype réalisé est constitué de 4 blocs à savoir : le bloc de mesures, bloc de traitement, bloc de charge et le bloc d'affichage.

La première étape consistait à simuler notre prototype sous PROTEUS-ISIS.

Ceci nous a permis d'une part de développer le programme sous l'environnement IDE d'Arduino, et d'autre part, de vérifier le bon fonctionnement de notre montage.

Une fois que la partie simulation est achevée, nous avons entamé la partie réalisation de notre circuit.

En effet, les résultats obtenus montrent une bonne efficacité du système pour charger une batterie de 12V.

Les perspectives qui découlent de ce mémoire portent sur le développement de notre circuit sont :

- L'utilisation de techniques MPPT plus élaborées basées sur des méthodes intelligentes telles que les réseaux de neurones et la logique floue comme titres d'exemple
- La réalisation pratique de l'ensemble du système avec des panneaux solaires réels et non avec des générateurs DC en tenant compte des difficultés que nous avons rencontrées.

## Références bibliographiques

- [1] Benomari Houari & Khelifa SidiMohamed. Réalisation d'un parking intelligent (smart parking) en utilisant la technologie des objets connectés-IOT. s.l. : Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen, Année Universitaire 2020-2021.
- [2] <https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/681>.
- [3] Anne Labouret et Michel Viloz. ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE 2ème édition.
- [4] <https://www.e-education.psu.edu/ae868/node/872>.
- [5] <https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/534>.
- [6] [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Band\\_filling\\_diagram.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Band_filling_diagram.svg).
- [7] [http://en.wikipedia.org/wiki/Band\\_gap](http://en.wikipedia.org/wiki/Band_gap).
- [8] <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:ShockleyQueisserFullCurve>.
- [9] <https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/606>.
- [10] <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pn-junction-equilibrium.png>
- [11] Baboulla Nadia. L'effet de l'épaisseur de la couche PEDOT:PSS sur le rendement d'une cellule solaire organique à base de P3HT/PCBM.
- [12] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-are-solar-cells/>
- [13] <https://www.seaward.com/gb/support/solar/faqs/00797-how-does-temperature-and-irradiance-affect-i-v-curves/>
- [14] <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/mppt-solar-charge-controllers>
- [15] Critical factors affecting the photovoltaic characteristic and comparative study between two maximum power point tracking algorithms. Drissi, H., Khediri, J., Zaafrane, W., & Braiek, E. B. 42(13), s.l. : International Journal of Hydrogen Energy, (2017). 8689-8702.
- [16] [https://www.deegesolar.co.uk/types\\_of\\_solar\\_panels/](https://www.deegesolar.co.uk/types_of_solar_panels/)
- [17] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-are-solar-cells>.
- [18] [https://www.researchgate.net/figure/Silicon-solar-cells-19\\_fig2\\_338788232](https://www.researchgate.net/figure/Silicon-solar-cells-19_fig2_338788232).
- [19] <https://www.electricaltechnology.org/2020/09/series-parallel-and-series-parallel-connection-of-solar-panels.html>
- [20] <https://www.ecodirect.com/What-is-a-PWM-Charge-Controller-s/144.htm>.
- [21] <https://www.solar-electric.com/learning-center/mppt-solar-charge-controllers.html>
- [22] Modeling of Photovoltaic System with modified Incremental Conductance Algorithm for fast changes of irradiance. Motahhir, S., El Ghzizal, A., Sebti, S., & Derouich, A. s.l. : International Journal of Photoenergy, in press., (2017).

- [23]Alain Bilbao « learreta réalisation de commandes mppt numériques » diplôme ingénieur technique industriel, septembre 2006
- [24]HARRAG Abdelghani& BENADEL Faiza , Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV.UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE 2015 – 2016
- [25]<https://www.electrical4u.com/buck-boost-converter/>
- [26]K Ishaque. Deterministic Particle Swarm Optimization Method for Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic System. s.l. : (Doctoral dissertation, Universiti Teknologi Malaysia), (2012).
- [27]SaadMotahhirAbdelilahChalhAbdelazizElGhizalAzizDerouich. Development of a low-cost PV system using an improved INC algorithm and a PV panel Proteus model.
- [28]<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618325952>
- [29]Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems. Verma, D., Nema, S., Shandilya, A. M., & Dash, S. K. 54, s.l. : Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. 1018-1034.
- [30] A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition. Ishaque, K., & Salam, Z. 19, s.l. : Renewable and Sustainable Energy Reviews, (2013). 475-488.
- [31] Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems. O.Waszynek. 9, s.l. : IEEE transactions on power apparatus and systems, 1983. 3031-3037.
- [32]<https://www.gotronic.fr/art-carte-arduino-uno-12420.htm>
- [33][https://www.editions-  
eni.fr/open/mediabook.aspx?idR=8457f073dc836b48a324c65a97bdc71b](https://www.editions-eni.fr/open/mediabook.aspx?idR=8457f073dc836b48a324c65a97bdc71b)
- [34]Flitti Fatima & Hadbi Rahma. Réalisation d'un système de remplissage automatique de bouteilles en utilisant une carte Arduino2021. Tlemcen : Université Aboubakr Belkaïd.Faculté de Technologie.
- [35]<https://www.hnhcart.com/blogs/microcontrollers/a-1>
- [36] Oussama, Ayad Benyounes & Tari. Simulation et réalisation d'un circuit détecteur de gaz interfacé à la carte Arduino. Tlemcen : Université Aboubakr Belkaïd. Faculté de Technologie, 2020.
- [37]<https://www.locoduino.org/spip.php?article57>
- [38]<https://diyi0t.com/arduino-uno-tutorial/>
- [39]<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/83943/TI/INA169.html>

- [40][https://www.researchgate.net/figure/Schematic-view-of-the-hardware-components-connected-to-the-Arduino-UNO\\_fig2\\_323718622/amp](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-view-of-the-hardware-components-connected-to-the-Arduino-UNO_fig2_323718622/amp)
- [41]<https://www.theengineeringprojects.com/2019/12/introduction-to-20-x-4-lcd-module.html>
- [42]<https://www.theengineeringprojects.com/2019/12/introduction-to-20-x-4-lcd-module.html>.
- [43]<https://components101.com/ics/pcf8574-ic-pinout-datasheet-equivalent-schematic-address-table-specs>
- [44][https://fr.m.wikiversity.org/wiki/Transistor/Transistor\\_MOSFET](https://fr.m.wikiversity.org/wiki/Transistor/Transistor_MOSFET)
- [45]<https://circuits-diy.com/wp-content/uploads/2021/04/IRFP250-Pinout.jpg>
- [46][https://www.utmel.com/productdetail/infineontechnologies-ir2104-3317661?gclid=CjwKCAjwnZaVBhA6EiwAVVyv9KQAgXdLHU5vSNo7N0eZbO4vB8a5yjj0\\_TH38Mxj2ZhddL6TVx5rkBoCCosQAvD\\_BwE](https://www.utmel.com/productdetail/infineontechnologies-ir2104-3317661?gclid=CjwKCAjwnZaVBhA6EiwAVVyv9KQAgXdLHU5vSNo7N0eZbO4vB8a5yjj0_TH38Mxj2ZhddL6TVx5rkBoCCosQAvD_BwE)
- [47]MAMOUNI Rania & ZEMMITE Seaddik.Etude et realisation d'un chargeur solaire par arduino.ouargla :universite kasdi merbah.faculté des sciences appliquées.2018
- [48]J. Ferrieux, f. Forest, « alimentations a découpage convertisseurs a résonance: principes composants modélisation ». Paris, France: Dunod, 1999.
- [49]AOUCHICHE NEDJMA. Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard 28 Janvier 2020.
- [50]M.Boukli-Hacene Omar « Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique » thèse de magister université Abou Bakr Belkaid Telemcen 2011.
- [51]Mohamed LAMINE Lies LEHARANI. Contribution à la commande MPPT numérique d'un panneau photovoltaïque à travers un hacheur parallèle entrelacé. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.2014
- [52]<https://learnaboutelectronics.org/PSU/psu32.php>.
- [53]<https://www.instructables.com/ARDUINO-SOLAR-CHARGE-CONTROLLER-Version-30>
- [54]<https://www.batterypowertips.com/basics-of-battery-charging-circuit-design-faq/>
- [55]<http://www.elektronique.fr/logiciels/proteus.php/>
- [56]<http://www.learnabout-electronics.org/PSU/psu33.php/>

## Résumé

La technique MPPT est couramment utilisée avec les éoliennes ou les systèmes de panneaux solaires pour maximiser l'extraction de puissance dans toutes les conditions.

Les panneaux solaires, par exemple, fournissent une sortie en courant continu. Mais cette sortie n'est pas stable, elle dépend de la quantité de lumière solaire, de la puissance du panneau, de la température, etc.

Le travail présenté dans ce mémoire, est une simulation et réalisation d'un contrôleur de charge solaire MPPT en utilisant la carte Arduino.

Ainsi, si vous voulez alimenter une charge, disons un moteur DC, il n'est pas recommandé de connecter la charge directement au panneau solaire. Ce que nous faisons, c'est d'abord charger une batterie et ensuite obtenir la puissance de la batterie et non directement du panneau solaire. Mais pour charger la batterie et contrôler la puissance du panneau, nous avons besoin de ce contrôleur MPPT, voici ce que nous avons construit.

## Mots clés

MPPT, panneaux solaires, la puissance, la température, la carte Arduino, la batterie

## Abstract

The MPPT technique is commonly used with wind turbines or solar panel systems to maximize power extraction under all conditions.

Solar panels for example, give DC output. But this output is not stable, it depends on the amount of sunlight, the panel power, the temperature and so on.

The work presented in this thesis is a simulation and realization of an MPPT solar charge controller using the Arduino board.

So, if you want to power a load, let's say a DC motor, is not recommended to connect the load directly to the solar panel. What we do is to first charge a battery and then get the power from the battery and not directly from the solar panel. But to charge the battery and control the power from the panel, we need this MPPT controller, this is what we built

## Keywords

MPPT, solar panel, the power, the temperature the Arduino board, the battery

## الملخص

تُستخدم تقنية وحدة تحكم شحن الطاقة الشمسية بشكل شائع مع وتربينات الرياح أو أنظمة الألواح الشمسية لزيادة استخراج الطاقة في جميع الظروف.

الألواح الشمسية على سبيل المثال تعطي ناتج التيار المستمر لكن هذا الإخراج غير مستقر فهو يعتمد على كمية ضوء الشمس وقوة اللوحة ودرجة الحرارة وما إلى ذلك.

العمل المقدم في هذه الأطروحة عبارة عن محاكاة وإدراك لوحدة تحكم شحن الطاقة الشمسية باستخدام لوحة أردوينو لذلك ، إذا كنت ترغب في تشغيل حمولة دعنا نقول محرك تيار مستمر لا ينصح بتوصيل الحمل مباشرة باللوحة الشمسية ، ما نقوم به هو شحن البطارية أولاً ثم الحصول على الطاقة من البطارية وليس مباشرة من الألواح الشمسية، لكن لشحن البطارية والتحكم في الطاقة من اللوحة ، نحتاج إلى وحدة تحكم شحن الطاقة الشمسية ، وهذا ما بنيناه في هذا المشروع.

## الكلمات المفتاحية

الألواح الشمسية ، درجة الحرارة ، لوحة أردوينو ، البطارية ، وحدة تحكم شحن الطاقة الشمسية