

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

UNIVERSITE ABDERAHMANEMIRA DE BEJAÏA



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Mémoire de Fin d'Etudes

En Vue de l'Obtention du Diplôme Master En

Electrotechnique.

Option Energies Renouvelables En Electrotechnique

Thème

**Etude d'un système photovoltaïque autonome
avec stockage**

Réalisé par :

ATMANIOU Koceila

Promotrice :

Mme. TADJINE Katia

Co-promoteur :

Mr. OUCHENE Nassim

Année universitaire : 2022/2023

Remerciement

Toute ma reconnaissance va à mon encadrante Mme. TADJINE Katia directrice de mémoire, avec qui j'ai eu la chance unique d'être enseigné, d'être dirigé et de travailler. Je tiens à la remercier sincèrement pour sa disponibilité, sa gentillesse, et sa patience. Grâce à elle ce mémoire a pu être menée et dirigée dans d'excellentes conditions.

Je tiens également à remercier Mr BENHARRAT Mounir qui m'a accueilli dans son entreprise spécialisée dans le photovoltaïque, Mounir Solar Energy, pour l'aide matérielle et les différents échanges que nous avons eu qui m'ont été précieux dans l'avancée de mes recherches.

Mes vifs remerciements à monsieur le président et les membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à ma grande famille en commençant par mes parents qui m'ont rendu la tâche plus facile, à mes trois chères adorables sœurs, mes deux chers frères ainsi que mes beaux-frères, neveux, toute ma famille, amis et amies pour leur soutien constant et leur patience.

Enfin, tous ceux et celle qui nous ont aidé et soutenu de près ou de loin à l'élaboration de ce travail trouvant ici l'expression de nos remerciements les plus sincères.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes Chers parents : pour leur soutien inconditionnel et leur encouragement constant ont été les piliers qui ont guidé mes pas tout au long de cette aventure. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.

À mes chers frères et chères sœurs, à mes neveux Anes, Ayden, Elena, maria, Inès, Assil, ainsi que mes beaux-frères et toute la famille ATMANIOU

À ma chère grande mère CHEURFI Cherifa notre deuxième maman et notre bonheur, que dieu Accorde à ma Grand-mère une place spéciale dans son vaste paradis.

À mon cher ami HAMMOU Youfrer.

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1 : Structure interne du soleil	3
Figure I.2 : Spectre de rayonnement solaire	6
Figure I.3 : Composants de rayonnement solaire	7
Figure I.4 : Principe de l'énergie photovoltaïque	8
Figure I.5 : Structure d'une cellule photovoltaïque	9
Figure I.6 : Panneau solaire en silicium monocristallin	10
Figure I.7 : Panneau solaire en silicium polycristallin	10
Figure I.8 : Panneau solaire en cellule de silicium amorphe	11
Figure I.9 : Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque	12
Figure I.10 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques	12
Figure I.11 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques	13
Figure I.12 : Caractéristique résultante d'un groupement en « série de n_s et en parallèle de n_p » des cellules identiques	14
Figure I.13 : Schéma synoptique des installations PV autonomes (Off -grid) et raccordées au réseau électrique (On-grid)	15
Figure I.14 : Schéma de base d'un système hybride solaire commun (batterie à couplage CC)	16
Figure I.15 : Branchements des modules PV	17
Figure I.16 : Différents modes de branchements des batteries	19
Figure I.17 : Batterie d'accumulateur au plomb	21
Figure I.18 : Batteries dans l'histoire	21
Figure I.19 : Schéma de principe du convertisseur DC/DC (BUCK/BOOST)	23
Figure I.20 : Schéma de principe du convertisseur DC/DC ((a) : BUCK ; (b) : BOOST)	23
Figure II.1 : Structure de système à étudié	28
Figure II.2 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale	28
Figure II.3 : Schéma électrique équivalent du modèle à une diode	29

Figure II.4 : Schéma électrique équivalent du modèle deux diodes	31
Figure II.5 : Schéma bloc du module PV réalisé sur MATLAB SIMULINK	32
Figure II.6 : Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$	33
Figure II.7 : Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$	33
Figure II.8 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$	34
Figure II.9 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$	34
Figure II.10 : Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$	35
Figure II.11 : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$	35
Figure II.12 : Circuit électrique du convertisseur DC-DC (Boost)	37
Figure II.13 : Circuit électrique du convertisseur DC-DC (Buck-Boost)	38
Figure II.14 : Modèle simplifié de l'onduleur de tension	39
Figure II.15 : Circuite équivalent de modèle CIEMAT	41
Figure II.16 : Schéma bloc du modèle CIEMAT réalisé avec MATLAB	44
Figure II.17 : Caractéristique $C_{batt} = f(I_{batt})$ pour une durée de 20h, ($I_{batt}= 7.5A$, $T_a= 25^{\circ}C$)	45
Figure II.18 : Caractéristique $V_{dech-batt} = f(I_{batt})$, tension de décharge-courant pour une durée de 20h (initialement chargé à 100%, $I_{batt}= 7.5A$, $T_a= 25^{\circ}C$)	45
Figure II.19 : Caractéristique $V_{ch-batt} = f(I_{batt})$, tension de charge-courant pour une durée de 20h (initialement chargé à 40%, $I_{batt}= 7.5A$, $T_a= 25^{\circ}C$)	45
Figure II.20 : Influence de la température sur la caractéristique $C_{batt} = f(I_{batt})$	46
Figure II.21 : Influence de la température sur la caractéristique $V_{dech-batt} = f(I_{batt})$..	46
Figure II.22 : Influence de la température sur la caractéristique $V_{ch-batt} = f(I_{batt})$	47
Figure III.1 : Insertion de contrôleur MPPT dans la chaîne de conversion PV.....	49
Figure III.2 : Caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$ d'un panneau photovoltaïque	51
Figure III.3 : Représentation du trajet de différentes incrémentsations sur la caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$	51
Figure III.4 : Diagramme fonctionnel de la méthode de Perturbation & d'Observation « P&O »	52
Figure III.5 : Caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$ avec l'algorithme P&O.....	53
Figure III.6 : Caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$ avec l'algorithme P&O.....	53
Figure III.7 : Caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$ avec l'algorithme P&O, en variant la température pour $E_s=1000 W/m^2$	54
Figure III.8 : Caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$ avec l'algorithme P&O, en variant la température pour $E_s=1000 W/m^2$	54

Figure III.9 : Caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$ avec l'algorithme P&O, en variant l'ensoleillement pour une température $T=25^{\circ}\text{C}$	55
Figure III.10 : Caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$ avec l'algorithme P&O, en variant l'ensoleillement pour une température $T=25^{\circ}\text{C}$	55
Figure III.11 : Principe de la commande « Incrément de conductance »	57
Figure III.12 : Organigramme de l'algorithme de la conductance incrémentielle « CI »	57
Figure III.13 : Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ avec l'algorithme de la CI	58
Figure III.14 : Caractéristique $I_{PV}(V_{PV})$ avec l'algorithme de la CI	58
Figure III.15 : Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ avec l'algorithme de la CI, en variant la température pour $E_s=1000 \text{ W/m}^2$	59
Figure III.16 : Caractéristique $I_{PV}(V_{PV})$ avec l'algorithme de la CI, en variant la température pour $E_s=1000 \text{ W/m}^2$	59
Figure III.17 : Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ avec l'algorithme de la CI, en variant l'ensoleillement, pour $T=25^{\circ}\text{C}$	60
Figure III.18 : Caractéristique $I_{PV}(V_{PV})$ avec l'algorithme de la CI, en variant l'ensoleillement, pour $T=25^{\circ}\text{C}$	60
Figure III.19 : Zoom sur la caractéristique $P_{pv}(t)$ de GPV par l'application de l'algorithme de la P&O	61
Figure IV.1 : Architecture de base pour l'électrification d'un site isolé	64
Figure IV.2 : Description illustrative de dépôt	77
Figure IV.3 : Emplacement du lieu géographiquement	78
Figure IV.4 : Image satellite du dépôt du bois	78
Figure IV.5 : Image des six panneaux PV installé, et leur fiche technique	82
Figure IV.6 : Image des quatre batteries branchées en série et en parallèle.....	84
Figure IV.7 : Onduleur de 2KW insérée dans l'installation PV et sa fiche technique...	86
Figure IV.8 : Désigne et architecture de l'armoire électrique utilisée pour la protection de notre système PV	74
Figure IV.9 : Schéma globale de l'installation photovoltaïque	94

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients des systèmes solaires PV	25
Tableau II.1 : Paramètres électriques de panneau « AS R04-280PERC »	32
Tableau II.2 : Paramètres électriques de la batterie	40
Tableau III.1 : Différentes méthodes de la commande MPPT	50
Tableau IV.1 : Tension recommandée pour les systèmes photovoltaïques	68
Tableau IV.2 : Consommation journalière de dépôt	79
Tableau IV.3 : Caractéristiques de notre système PV	80
Tableau IV.4 : Tensions recommandées pour les systèmes photovoltaïques	81
Tableau IV.5 : Fiche technique de panneau PV utilisée, sous forme d'un tableau ...	81
Tableau IV.6 : Fiche technique de la batterie utilisée dans l'installation, sous forme d'un tableau	83
Tableau IV.7 : Fiche technique de l'onduleur utilisée dans notre installation, sous forme d'un tableau	85
Tableau IV.8 : Devis estimatif des panneaux	91
Tableau IV.9 : Devis estimatif des batteries	91
Tableau IV.10 : Devis estimatif des câbles électriques utilisée	91
Tableau IV.11 : Devis estimatif des onduleurs	92
Tableau IV.12 : Devis estimatif total de l'armoire électrique	92
Tableau IV.13 : Devis estimatif de l'installation photovoltaïque	92

Nomenclature

Symboles

V_{co}, V_{oc}	Tension de circuit ouvert, voltage open circuit	[V]
I_{cc}, I_{sc}	Courant de court-circuit, short-circuit current	[A]
V_{mpp}, V_{mp}	Tension à puissance maximal	[V]
I_{mpp}, I_{mp}	courant à puissance maximal	[V]
V_{opt}	tension à puissance optimal	[V]
I_{opt}	courant à puissance optimal	[A]
n_s	Nombre de cellules en série	
n_p	Nombre de cellules en parallèle	
P_{PV}	Tension fournie par le générateur photovoltaïque ou le module	[W]
I_{PV}	Courant fournie par le générateur photovoltaïque ou le module	[A]
V_{PV}	Tension fournie par le générateur photovoltaïque ou le module	[V]
I_{ph}	Courant produit par la photopile	[A]
I_d	Le courant de diode	[A]
V	Tension aux bornes de la cellule	[V]
I_s	Courant de polarisation de la diode ou courant de saturation	[A]
E_{ref}	Ensoleillement de référence.	[W/m ²]
T_c	Température absolue de la cellule.	[°C]
T_{cref}	Température de référence.	[°C]
E_g	Energie de gap.	
I_s	Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité.	[eV]
R_s	Résistance série (résistance de contacte).	[Ω]

R_{sh}	Résistance shunt	[C]
α	Rapport cyclique	
I_{dc}	Courant continu	[A]
V_{dc}	Tension continue	[V]
I_c	Courant qui traverse le condensateur	[A]
N_b	Nombre de cellule constituant la batterie	
R_i	Résistance interne d'une cellule de la batterie,	[Ω]
C_{10}	Capacité de la batterie déchargée en 10 heures	[F]
I_{10}	Courant de décharge en 10 heures	[A]
ΔT	Echauffement de la batterie	
Q_d	Quantité de charge manquante à la batterie	[F]
V_g	Tension aux bornes de la batterie atteinte	[V]
$V_{batt-ch}$	Tension de charge de la batterie.	[V]
$V_{batt-dch}$	Tension de décharge de la batterie.	[V]
η_b	Rendement de la batterie.	
R_{dch}	Résistance de la décharge	[Ω]
R_{ch}	Résistance de la charge	[Ω]
Δt	Nombre d'heure d'utilisation de chaque appareil pendant une journée	[h]
P_{ch}	Puissance de charges totale	[W]
$P_{pv,tot}$	Puissance crête du champ PV (en watt crête)	[Wc]
E_s	Ensoleillement (l'ensellement varié considérablement selon la région, la saison et l'heure de la journée)	[W/m ²]
$\sum p$	Somme des pertes de l'installation (pertes due à la conversion de l'énergie, la température, l'ombrage, l'orientation et l'inclinaison)	
N_{pv}	Nombre de panneaux PV	

$P_{pv,tot}$	Puissance totale des panneaux PV	[Wc]
$P_{pv,u}$	Puissance d'un seul panneau PV	[Wc]
$N_{pv,s}$	Nombre de panneaux PV en série	
V_{ch}	Tension de fonctionnement de champ PV	[V]
$N_{pv,p}$	Nombre de panneaux PV en parallèle	
$N_{pv,tot}$	Nombre de panneaux PV	
$N_{pv,s}$	Nombre de panneaux PV en série	
C_{batt}	Capacité nominale des batteries	[Ah]
J_{aut}	Jour d'autonomie	[J]
PDD	Profondeur de décharge d'une batterie	
N_{batt}	Nombre de batteries	
$N_{batt,s}$	Nombre de batteries en série	
$N_{batt,p}$	Nombre de batteries parallèle	
N_{batt}	Nombre de batteries	
P_{ond}	Puissance de l'onduleur	[W]
$N_{pv,s,min}$	Nombre minimal des panneaux PV en série.	
$N_{pv,s,max}$	Nombre maximal des panneaux PV en parallèle	
$N_{pv,p,max}$	Nombre maximal des panneaux en parallèle	
S	Section des câbles.	[mm ²]
ρ	Résistivité électrique.	[Ω .m]
L	Longueur du câble.	[m]
ΔV	Chute de tension.	[V]
V_{batt}	Tension du parc des batteries.	[V]

$N_{batt,s}$	Nombre de batteries en série.	
I_{batt}	Courant des batteries.	[A]
β	Coefficient mathématique	
$\cos\delta$	Facteur de puissance	

Acronymes

STC	Standard Test Condition
PV	Photovoltaïque
MPP	Maximum power point
DC	Direct current
AC	Alternative current
MPPT	Maximum Power Point Tracking
OFF-grid	Non raccordée au réseau
ON-grid	Raccordée au réseau
GPV	Générateur Photovoltaïque
P_{MAX}	Puissance maximal
FF	Facteur de forme
MPPT	Maximum Power Point Tracking
SC	Supercondensateurs
ED_f	Energie déficitaire
ED_m	Energie demandée
B_j	Besoin journalier
P_c	Puissance crête

SARL	Société à Responsabilité Limitée
MATLAB	Matrix laboratory ou Laboratoire des matrices
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas
EDC	Etat de charge
EDD	Etat de décharge
P&O	Perturbation et observation
CI	Conductance incrémentielle

Table des matières

Table des matières

Introduction générale.....	1
<u>Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques</u>	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Le soleil.....	3
I.2.1. L'énergie solaire.....	4
I.2.2. L'exploitation de l'énergie solaire.....	4
I.2.2.1 Les différents types de panneaux solaires.....	5
I.2.3. Le rayonnement solaire.....	5
I.2.3.1. Spectre du rayonnement.....	6
I.2.3.2. Rayonnement solaire à travers l'atmosphère.....	6
I.2.3.3. Rayonnement direct.....	7
I.2.3.4. Rayonnement diffus.....	7
I.2.3.5. Rayonnement réfléchi (où l'albédo du sol)	8
I.2.3.6. Rayonnement global	8
I.3. L'énergie solaire photovoltaïque (PV)	8
I.3.1. Les cellules photovoltaïques.....	8
I.3.1.1. Structure d'une cellule photovoltaïque.....	9
I.3.1.2. Principaux types de cellules PV.....	9
I.3.1.3. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	11
I.3.1.3.1. Association des cellules photovoltaïques.....	12
I.4. Descriptions des systèmes photovoltaïques.....	14
I.4.1. Le générateur photovoltaïque (GPV)	16

I.4.2. Le régulateur de charge.....	17
I.4.2.1. Principe de fonctionnement de régulateur MPPT	18
I.4.3. Système de stockage.....	18
I.4.3.1. Les batteries	18
I.4.3.1.1 Connexions des batteries	19
I.4.3.1.2. Types de batteries (électrochimiques)	19
I.4.3.2. Supercondensateurs/Ultra-condensateurs	21
I.4.4. Convertisseur statique DC/DC (Hacheur)	22
I.4.5. Convertisseur statique DC/AC (Onduleur)	23
I.4.6. Les armoires de protection et de distribution DC & AC.....	24
I.5. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	25
I.6. Conclusion.....	25

Chapitre II : Modélisation du système photovoltaïque

II.1 Introduction.....	27
II.2. Inventaire des composants du système à étudié	27
II.3. Modélisation mathématique.....	28
II.3.1. Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV).....	28
II.3.1.1 Modèle idéal.....	28
II.3.1.2. Modèle à une diode.....	29
II.3.1.3. Modèle à deux diodes.....	31
II.3.1.4. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module	33
II.3.1.4.1. Influence de l'ensoleillement.....	33
II.3.1.4.2. Influence de la température	34

II.3.2. Modélisation des convertisseurs.....	36
II.3.2.1. Modélisation d'un hacheur survolteur (Boost).....	36
II.3.2.2. Modélisation de l'hacheur Buck-Boost.....	38
II.3.2.3. Modélisation de l'onduleur.....	39
II.3.3. Modélisation du bus continu.....	40
II.3. Le modèle de simulation CIEMAT.....	40
II.3.4.1 Équation de formulation CIEMAT.....	41
II.3.4.1.1. La capacité.....	41
II.3.4.1.2. L'état de charge.....	42
II.3.4.1.3. Tension de charge.....	42
II.3.4.1.4. Tension de décharge.....	43
II.3.4.1.5. Resistance de la batterie.....	43
II.3.4.1.6. Resistance en charge.....	43
II.3.4.1.7. Resistance en décharge.....	43
II.3.4.1.8. Rendement de charge et décharge.....	44
II.3.4.2. Influence de la température sur les caractéristiques de la batterie.....	46

Chapitre III : Optimisation du générateur photovoltaïque

III.1. Introduction.....	48
III.2. Optimisation du générateur photovoltaïque.....	48
III.2.1. Adaptation de l'énergie photovoltaïque.....	49
III.2.2. La commande du point de puissance maximale.....	49
III.2.2.1. Méthode de Perturbation et Observation (P&O).....	51
II.2.2.1.1. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques.....	53
II.2.2.1.1.1. Influence de la température.....	54
III.2.2.1.1.2. Influence de l'ensoleillement.....	55

III.2.2.2. Méthode de la conductance incrémentielle (CI)	56
III.2.2.2.1. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques.....	58
II.2.2.2.1.1. Influence de la température.....	59
II.2.2.2.1.2. Influence de l'ensoleillement.....	60
III.3. Conclusion.....	62

Chapitre IV : Dimensionnement du système photovoltaïque étudié

IV.1. Introduction.....	63
IV.2. Le but de dimensionnement.....	63
Partie I : principe de dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome avec stockage.....	63
IV.3. Description du système photovoltaïque à dimensionner.....	63
IV.4. Dimensionnement du système photovoltaïque.....	64
IV.4.1. Choix des méthodes de dimensionnement.....	64
IV.4.1.1. La méthode du mois le plus défavorable.....	64
IV.4.1.2. La méthode de la moyenne annuelle.....	65
IV.4.1.3. Méthode de probabilité d'erreur sur la charge (L.L.P)	65
IV.4.2. Gisement solaire et coordonnées géographique.....	66
IV.4.3. Etape de dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome.....	66
IV.4.3.1. Evaluation du besoin en électricité (Bj)	66
IV.4.3.1.1. Consommation globale de système.....	67
IV.4.3.2. Evaluation de la puissance crête du champ photovoltaïque (Pc)	68
IV.4.3.3. Dimensionnement des panneaux.....	69
IV.4.3.4. Dimensionnement des batteries.....	70
IV.4.3.5. Dimensionnement de l'onduleur.....	72
IV.4.3.6. Dimensionnement des câbles.....	73

IV.4.3.6.1. Section des câbles côté DC.	74
IV.4.3.6.2. Section des câbles coté AC.....	75
Partie II : Etude et réalisation d'une installation photovoltaïque autonome avec l'entreprise « MSE : Mounir Solar Energy »	77
IV.1. Présentation du projet.....	77
IV.2. Coordonnées géographiques du lieu de projet.. ..	78
IV.3. Estimation de la consommation journalière de dépôt.....	79
IV.4. Etapes de dimensionnement de l'installation.....	79
IV.4.1. Evaluation du besoin électrique.....	80
IV.4.2. La puissance crête du champ photovoltaïque (W_C)	80
IV.4.3. Dimensionnement des panneaux photovoltaïques.....	81
IV.4.4 Dimensionnement des batteries.....	82
IV.4.5. Dimensionnement du l'onduler.....	84
IV.4.5.1. Compatibilité en puissance.....	84
IV.4.5.2. Compatibilité en tension.....	86
IV.4.5.3. Compatibilité en courant.....	87
IV.4.6. Dimensionnement des câbles.....	87
IV.5. Le système de protection de notre installation photovoltaïque.....	89
IV.5.1. Différents éléments de protection utilisée pour la réalisation de l'armoire.....	90
IV.6. Devis estimatif total de l'installation PV.....	91
IV.6.1. Devis estimatif total des panneaux.	91
IV.6.2. Devis estimatif total des batteries.....	91
IV.6.3. Devis estimatif total des câbles électriques utilisée.....	91
IV.6.4. Devis estimatif total des onduleurs.....	92
IV.6.5. Devis estimatif total de l'armoire électrique.....	92

IV.6.6. Devis estimatif total de l'installation photovoltaïque.....	92
IV.8. Elaboration du schéma global de notre système photovoltaïque installé.....	94
IV.8. Conclusion.....	95
Conclusion générale.....	96

Introduction générale

Introduction générale

Produire de l'électricité nécessite une source d'énergie comme : les combustibles fossiles (le charbon, le fioul et le gaz), le nucléaire (l'uranium) et les énergies renouvelables (l'eau, le vent, le soleil, la chaleur, la matière organique et les énergies marines) qui sont indispensables à l'industrie, aux bâtiments et à tous les aspects de la vie quotidienne, l'électricité, en raison de ses modes de production, est aussi la principale responsable des émissions mondiales de CO₂. Le choix des technologies sera déterminant pour les maîtriser, car aux deux extrêmes, entre le charbon et une énergie renouvelable, l'impact carbone de la production d'électricité contient une différence remarquable [1].

Le choix des combustibles fossiles ou du nucléaire comme source d'énergies représente des problématiques :

- L'émissions de CO₂ (gaz à effet de serre), implique l'augmentation des températures et ainsi, la perturbation de tout notre écosystème (principalement le réchauffement climatique).
- L'épuisables au fil de temps.
- La création de plusieurs conflits économiques et sociaux à cause de la répartition inégale de ces sources dans le monde.

Aujourd'hui, nous choisissons les énergies renouvelables pour le fait qu'elles ne soient théoriquement pas épuisables comme les énergies fossiles, les énergies renouvelables ont d'autres avantages sur le plan écologique, l'électricité produite à partir de sources de production d'énergie renouvelable émet très peu de CO₂ notamment lorsqu'on la compare aux énergies fossiles comme le charbon. Pour cette raison, les énergies renouvelables sont spécialement un outil indispensable de la lutte contre le réchauffement climatique et elles sont aussi considérées comme un facteur de résilience, car elles permettent des productions décarbonées et décentralisées [1].

« Le climat que nous connaissons à l'avenir dépend des décisions que nous prenons maintenant », Le développement technologique dans le domaine des énergies renouvelables détermine l'énergie solaire photovoltaïque comme une source d'énergie fiable et écologique pour un monde propre et vivable [2], l'énergie solaire photovoltaïque est l'énergie de soleil

convertit en énergie électrique par un processus appelée la conversion photovoltaïque. Cette conversion se fera par un dispositif dit panneau photovoltaïque contenant des cellules aussi appelées cellules photovoltaïques qui sont généralement fabriquées en silicium, quand ces cellules sont exposées aux rayonnements solaires, donne naissance à un courant électrique continu (CC) qui sera insérer dans un réseau équipé de différents dispositifs nécessaire selon le type et le besoin de système installée. Cependant, le rendement d'un système photovoltaïque ainsi que sa production sont influencés par les paramètres météorologiques (Ensoleillement et température), les techniques de recherche du point de puissance maximale (MPPT, Maximum Power Point Tracking) ont été développées en réponse à cette problématique, en effet, il existe plusieurs méthodes de commande d'un régulateur de charge solaire telles que :

- La méthode de perturbation et observation (P&O)
- La méthode de la conductance incrémentielle (CI)
- La logique floue (la logique fuzzy)

L'objectif de cette étude est de présenter et d'analyser tout un système photovoltaïque autonome, et le dimensionnement nécessaire lors de la réalisation d'une installation pareille.

Le mémoire se présente sous forme de quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une description générale des systèmes photovoltaïques, en commençant par la source principale de la conversion photovoltaïque qui est le soleil ainsi que le principe de cette conversion, ensuite nous présentons de manière générale les composants nécessaires pour l'adaptation de la charge à la source, et les systèmes de stockage les plus utilisés.

Dans le deuxième chapitre, notre travail consiste à analyser et à prédire le comportement des composants principaux d'un système photovoltaïque autonome avec stockage et l'influence des conditions météorologiques sur notre générateur photovoltaïque sans l'application de la commande MPPT.

En réponse à la problématique étudiée dans le chapitre deux, dans le troisième chapitre, nous allons analyser l'influence de la commande MPPT sur la production d'un générateur photovoltaïque sous différentes conditions météorologiques et différentes méthodes de commande de régulateur de charge MPPT pour but de l'optimisation de notre système.

Le quatrième chapitre est une étape primordiale avant chaque réalisation d'un système photovoltaïque sert à effectuer un dimensionnement juste et efficace.

Chapitre I :

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, elle pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. Parmi les meilleures principales techniques d'exploitation de l'énergie solaire on distingue le photovoltaïque [3].

La découverte de l'effet photovoltaïque remonte à 1839, l'année où le physicien français Alexandre Edmond Becquerel découvre la possibilité de produire de l'électricité grâce à la lumière et la présence de matériaux semi-conducteurs comme le silicium [4].

I.2. Le soleil

Est un astre dont le rayonnement produit la lumière du jour et réchauffe la terre. Le soleil est la source principale de l'Energie photovoltaïque [5].

Les caractéristiques du soleil sont résumées comme suit : la masse est de 2×10^{30} kg, la longueur du faisceau est de 700 000 km, âgé de 5×10^9 ans et estimé à environ 5 milliards d'années de vie supplémentaires. La température de surface du soleil est d'environ 5800°K , alors que la température interne est d'environ $1,5 \times 10^7$ °K. Le processus de fusion nucléaire de l'hydrogène en hélium se traduit par une température élevée du soleil et de grandes quantités d'énergie émises en permanence [6].

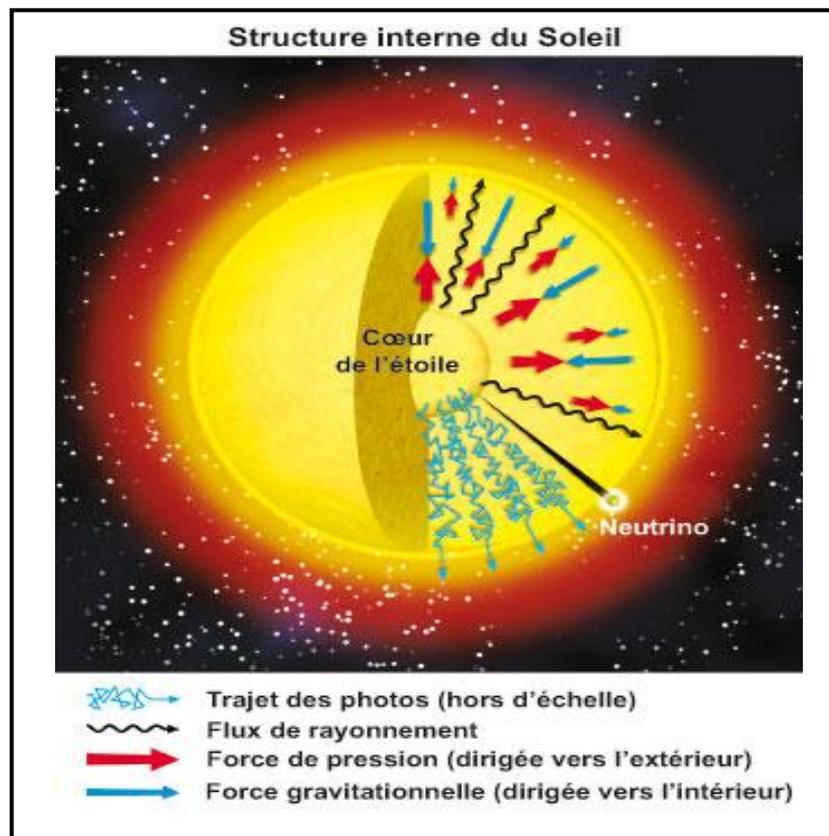


Figure I.1 : Structure interne du soleil [7].

I.2.1. L'énergie solaire [8]

L'énergie solaire représente l'énergie émise par le rayonnement du soleil. Du spectre des ondes radio aux rayons gamma, en passant par la lumière visible, ces rayonnements sont constitués de photons, les éléments fondamentaux de la lumière et les porteurs de l'énergie solaire. L'énergie solaire provient des réactions de fusion nucléaire qui se produisent au sein du Soleil. Sur notre planète, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, des mouvements du vent et de la photosynthèse des végétaux. Toutes les chaînes alimentaires, y compris celles qui soutiennent le règne animal, y compris l'humanité, dépendent des végétaux en tant que source primordiale.

L'énergie solaire est ainsi à l'origine de toutes les formes de production énergétique aujourd'hui utilisées sur Terre, à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice. L'homme utilise l'énergie solaire pour la transformer en d'autres formes d'énergie : énergie chimique (les aliments que notre corps utilise), énergie cinétique, énergie thermique, énergie électrique ou biomasse.

Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir de la source énergétique primaire qu'est le rayonnement solaire.

Actuellement, il existe deux voies principales d'exploitation de l'énergie solaire :

- Le solaire photovoltaïque qui transforme directement le rayonnement solaire en électricité ;
- Le solaire thermique qui transforme directement le rayonnement en chaleur. Le solaire dit « thermodynamique » est une variante du solaire thermique. Cette technique se différencie car elle utilise l'énergie thermique du soleil afin de la transformer dans un second temps en électricité.

De nombreux programmes de recherche sont en cours afin d'améliorer les rendements des nouvelles technologies d'exploitation de l'énergie solaire.

I.2.2. L'exploitation de l'énergie solaire

L'exploitation de l'énergie solaire se fait par un dispositif dit « panneau solaire » qui a pour but de transformer l'énergie qu'on obtient du soleil (lumière, chaleur...) vers une autre forme d'énergie utile à utiliser (électricité, énergie calorifique) [9] :

I.2.2.1. Les différents types de panneaux solaires

Il existe trois types de panneaux solaires qui se distinguent par leurs caractéristiques et le type d'énergie qu'ils produisent :

a. panneau solaire thermique [10] : le panneau solaire thermique est un dispositif qui transforme de l'énergie solaire en énergie calorifique. Il est utilisé pour avoir de l'eau chaude sanitaire, mais aussi pour alimenter le système de chauffage. Contrairement au panneau photovoltaïque, il ne permet pas d'obtenir de l'électricité.

b. panneau solaire aérovoltaïque [11] : un panneau solaire aérovoltaïque est un panneau solaire hybride qui combine la technologie des panneaux photovoltaïque et thermique, Il se démarque par le fait que sa couche inférieure utilise la circulation de l'air pour récupérer la chaleur solaire. L'air chaud ainsi récupéré sera diffusé dans le logement ou utilisé dans un chauffe-eau thermodynamique. On peut généralement l'utiliser pour :

- Le séchoir solaire
- Le chauffage d'une maison
- Des utilisations industrielles.
- La ventilation par insufflation

c. panneau solaire photovoltaïque [10] : est le capteur solaire qui convertit les rayons solaires en électricité. Un panneau photovoltaïque est composé de cellules photovoltaïques, formées de couches d'un matériau dit « semi-conducteur ». Ce matériau est essentiel pour assurer l'effet photovoltaïque, soit la conversion des rayons du soleil en courant électrique.

L'unité de la puissance d'un panneau PV est le watt-crête (Wc) ou le kilowatt-crête (kWc). Elle indique la puissance électrique maximale qu'un panneau peut fournir dans des conditions idéales ou conditions STC. En conditions réelles, cette puissance est forcément inférieure à celle qui est mesurée en laboratoire, puisque les meilleures conditions possibles ne peuvent généralement pas être toutes réunies.

I.2.3. Le rayonnement solaire [12]

Le rayonnement solaire représente les ondes électromagnétiques émises par le soleil. La lumière du soleil, qui se déplace à une vitesse de 300 000 km/s, prend environ huit minutes pour atteindre la Terre. Ce rayonnement solaire représente environ 8400 fois la consommation

énergétique totale de l'humanité. Cela équivaut à une puissance instantanée de 1 kilowatt crête par mètre carré (1 kWc/m²) répartie sur l'ensemble du spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge.

I.2.3.1. Spectre du rayonnement [12]

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique sur une plage de longueurs d'onde allant de 0,22 à 10 microns (μm). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se répartit approximativement de la manière suivante :

- Environ 9% dans la plage des ultraviolets (<0,4 μm).
- Environ 47% dans la plage visible (0,4 à 0,8 μm).
- Environ 44% dans la plage des infrarouges (>0,8 μm).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement avec une puissance moyenne d'environ 1,37 kilowatt par mètre carré (KW/m²), variant d'environ 3% en fonction de l'éloignement ou de l'approche de la Terre par rapport au soleil lors de sa rotation autour de celui-ci. Cependant, une partie de ce rayonnement est absorbée par l'atmosphère. La figure (I.2) représente la variation de la répartition spectrale de l'énergie.

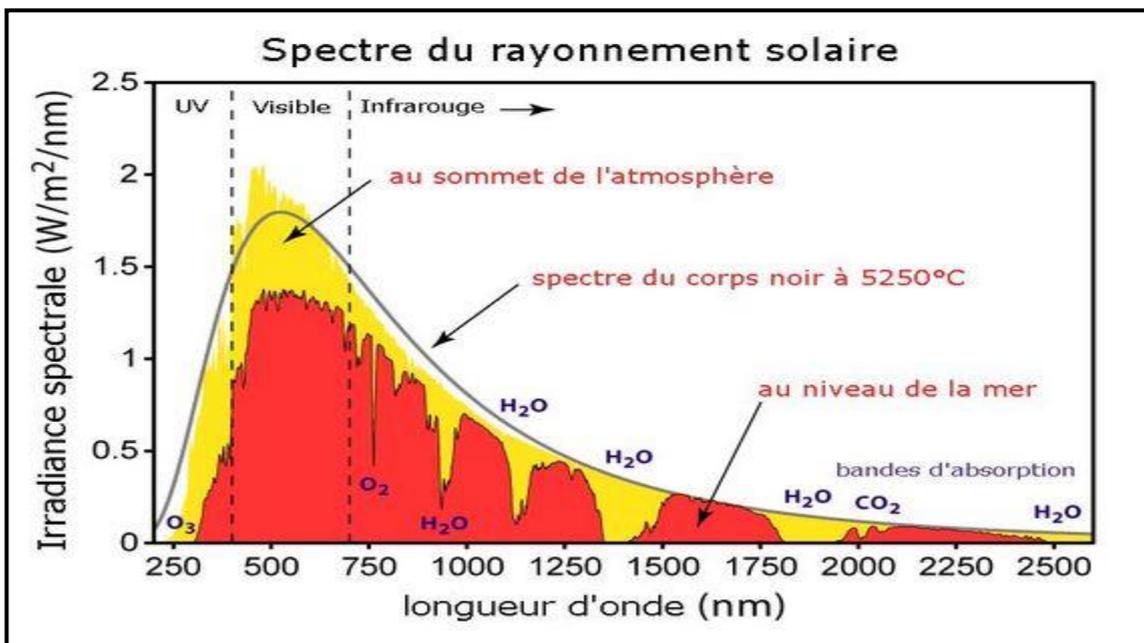


Figure I.2 : Spectre de rayonnement solaire [13].

I.2.3.2. Rayonnement solaire à travers l'atmosphère [12]

En traversant l'atmosphère, une partie du rayonnement solaire parvient directement au sol, l'autre partie qui a été diffusée, provient du reste de la voute céleste hors du disque solaire.

Alors on distingue plusieurs composantes : directe, diffuse et réfléchie, c'est la somme qui donne le rayonnement global.

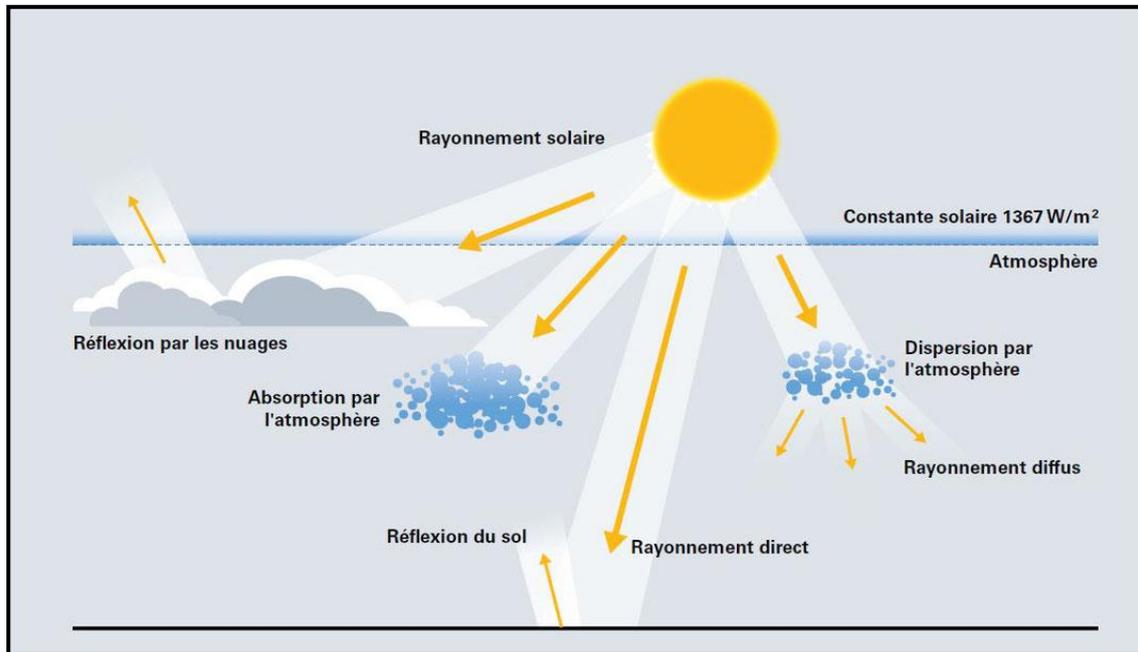


Figure I.3 : Composantes de rayonnement solaire [12].

I.2.3.3. Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le flux solaire qui atteint directement la surface terrestre en provenance du soleil. Sa quantité est influencée par l'épaisseur de l'atmosphère que les rayons solaires doivent traverser et par l'angle d'inclinaison des rayons par rapport au sol. L'intensité du rayonnement direct peut être mesurée à l'aide d'un instrument appelé pyrhéliomètre. Pour assurer une mesure précise, le pyrhéliomètre doit être équipé d'un dispositif qui le maintient constamment orienté vers le soleil [14].

I.2.3.4. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus se produit lorsque le rayonnement solaire direct se disperse dans les nuages et les particules présentes dans l'atmosphère. Il est causé par la diffraction de la lumière due aux nuages et aux molécules en suspension dans l'air, ainsi que par la réflexion sur le sol. Contrairement au rayonnement direct, le rayonnement diffus ne suit pas une trajectoire précise depuis le soleil jusqu'à un point d'observation à la surface de la Terre. Il se propage dans différentes directions, ce qui le rend moins concentré et moins direct [14].

I.2.3.5. Rayonnement réfléchi (où l'albédo du sol)

Le rayonnement réfléchi est le rayonnement solaire qui rebondit sur la surface du sol, en particulier lorsque celle-ci est très réfléchissante, comme dans le cas de l'eau, de la neige ou d'autres surfaces similaires [15].

I.2.3.6. Rayonnement global

Est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le Rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface [15].

I.3. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) [16]

Le terme « photovoltaïque » peut signifier le phénomène physique : « l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839 » ou la technologie associée. L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité générée par la conversion d'une partie du « **rayonnement solaire** » à l'aide d'une « **cellule photovoltaïque**. De manière schématique, lors de certaines conditions, un photon de lumière incidente peut entraîner le déplacement d'un électron, générant ainsi un courant électrique.

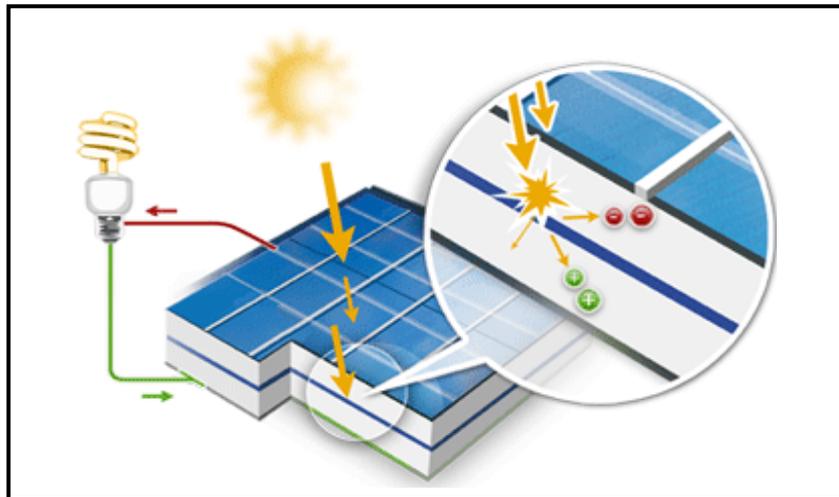


Figure I.4 : principe de l'énergie solaire photovoltaïque.

I.3.1. Les cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont constituées de matériaux semi-conducteurs, principalement fabriqués à partir de silicium dopé positivement avec du bore. Lorsqu'ils sont exposés à la lumière, ces matériaux émettent des électrons qui sont libérés du matériau et circulent à travers un circuit fermé, engendrant ainsi de l'électricité [17].

I.3.1.1. Structure d'une cellule photovoltaïque [18]

La structure d'une cellule photovoltaïque est relativement simple. Elle comprend principalement deux couches de semi-conducteur dopé au silicium, une de type N et l'autre de type P, qui forment une jonction P-N. La cellule est également équipée de deux électrodes, comme illustré dans la figure (I.5). Pour améliorer l'efficacité de l'absorption des photons, la surface de la cellule est recouverte d'une couche de verre noir qui la protège des éléments atmosphériques. Un revêtement antireflet est appliqué pour réduire les pertes de réflexion des photons à moins de 5%. Une grille de contact est utilisée pour minimiser la distance parcourue par les photons et assurer qu'ils atteignent les semi-conducteurs. Le cœur de la cellule photovoltaïque est constitué de deux couches minces de semi-conducteurs de type P et N formant une jonction. Enfin, un contact arrière favorise une meilleure conduction électrique.

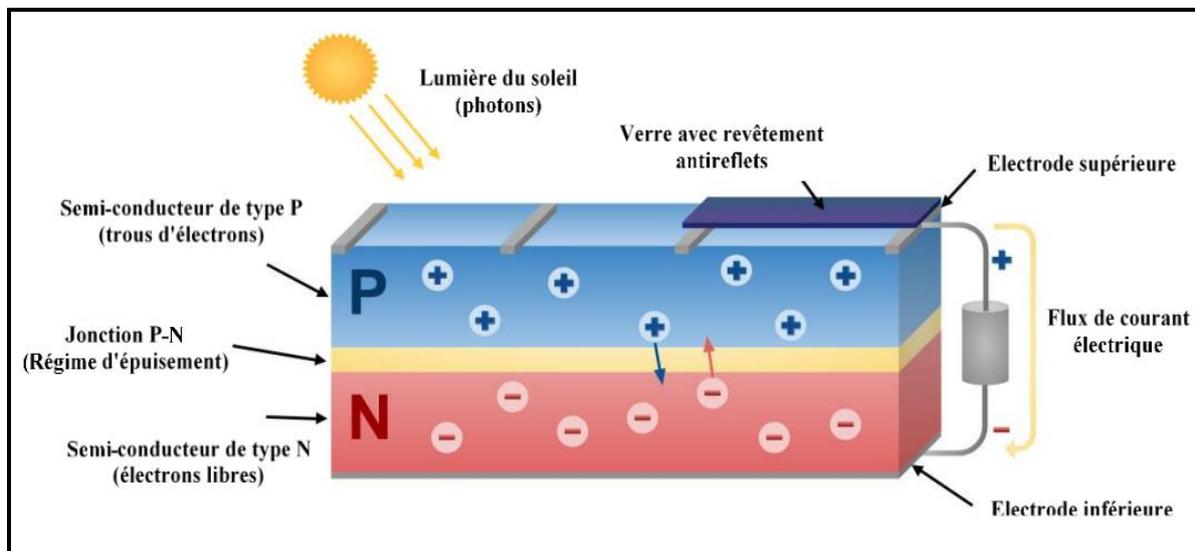


Figure I.5 : Structure d'une cellule PV [18].

I.3.1.2. Principaux types de cellules PV [19]

Le silicium (Si) est le matériau le plus largement utilisé dans l'industrie photovoltaïque. Il se trouve naturellement dans le sable sous forme d'oxyde de silicium (SiO_2). Pour être utilisé dans les cellules photovoltaïques, le silicium est purifié jusqu'à atteindre une grande pureté de 99,99%. Les cellules solaires en silicium sont classées en quatre catégories distinctes, en fonction de la structure du matériau de base à partir duquel elles sont fabriquées. Les différents types de cellules solaires en silicium sont les suivants :

a. Silicium monocristallin [19] : Le silicium sert de matériau de base dans la fabrication des cellules photovoltaïques. Il subit un processus de purification, de fusion et de

crystallisation pour former des lingots. Ces lingots sont ensuite découpés en fines tranches pour créer des cellules individuelles. Les cellules solaires en silicium présentent un rendement compris entre 15% et 20% (l'inclinaison, l'orientation et la propreté ont une influence). Elles sont caractérisées par un coût de fabrication élevé et ont une couleur foncée, généralement bleu mais parfois noir ou gris, comme illustré dans la figure (I.6).



Figure I.6 : panneau solaire en silicium monocristallin [20].

b. Silicium polycristallin [19] : Ce type spécifique de cellule solaire en silicium est relativement grand et peut être facilement formé en carré, ce qui réduit au minimum les zones inactives entre les cellules. Son efficacité varie généralement entre 10% et 14%. Ces cellules se distinguent par un coût inférieur à celui des précédentes en raison de leur processus de fabrication, et elles ont généralement une couleur bleu clair.

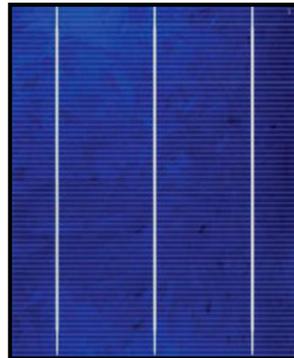


Figure I.7 : panneau solaire en silicium polycristallin [21].

c. Silicium amorphe [18] : Les cellules solaires en silicium amorphe, également connues sous le nom de "cellules à couche mince", sont des matériaux solides où les atomes de silicium sont beaucoup moins ordonnés que dans la forme cristalline. Grâce à l'utilisation de jonctions multiples, ce type de cellules peut atteindre un rendement maximal d'environ 10%. Cependant, le coût d'installation est réduit par rapport aux autres types de cellules solaires. De

plus, leur rendement n'est pas affecté par l'augmentation de la température. Les cellules solaires en silicium amorphe sont également moins chères à produire que celles en silicium cristallin.

Par ailleurs, d'autres matériaux tels que l'arséniure de gallium et le tellure de cadmium sont en cours de tests en laboratoire. Ces matériaux présentent un rendement d'environ 38%, ce qui est considérablement plus élevé [18] [19].

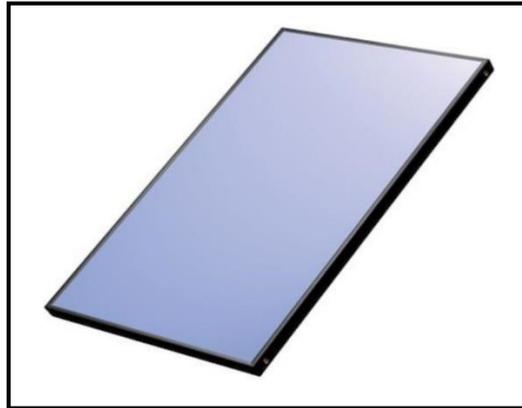


Figure I.8 : panneau solaire en cellule de silicium amorphe [22].

d. Ruban de silicium : Ce type de cellule solaire est fabriqué en produisant un ruban de silicium cristallin fondu plutôt qu'un lingot. Ces cellules solaires à ruban ont un rendement d'environ 13%, ce qui est relativement élevé. Cependant, leur coût de production est très élevé, et la production industrielle de ces cellules reste limitée en raison de contraintes économiques [18].

I.3.1.3. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque [23]

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque dépend principalement des conditions d'ensoleillement et de température. Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I_{pv} - V_{pv}) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe :

- Sa tension à vide « V_{co} » : Cette valeur représente la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant de court-circuit « I_{cc} » : Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.

- Son point de puissance maximal « MPP » : (en anglais : Maximal Power Point) obtenu pour une tension optimale et un courant optimal : V_{mpp} , I_{mpp} (parfois appelés aussi V_{opt} , I_{opt}).

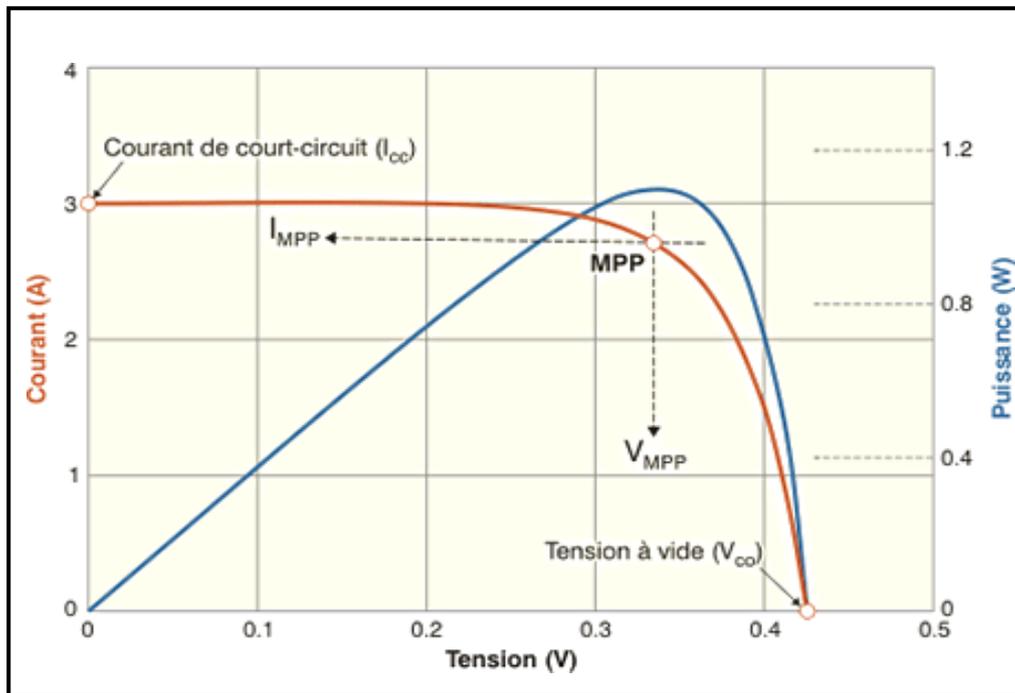


Figure I.9: caractéristique électrique des cellules photovoltaïques.

I.3.1.3.1. Association des cellules photovoltaïques [23]

a. Association en série : quand elles sont connectées en série (string), les cellules solaires sont parcourues par le même courant, et la tension totale résultante est égale à la somme des tensions produites par chacune des cellules.

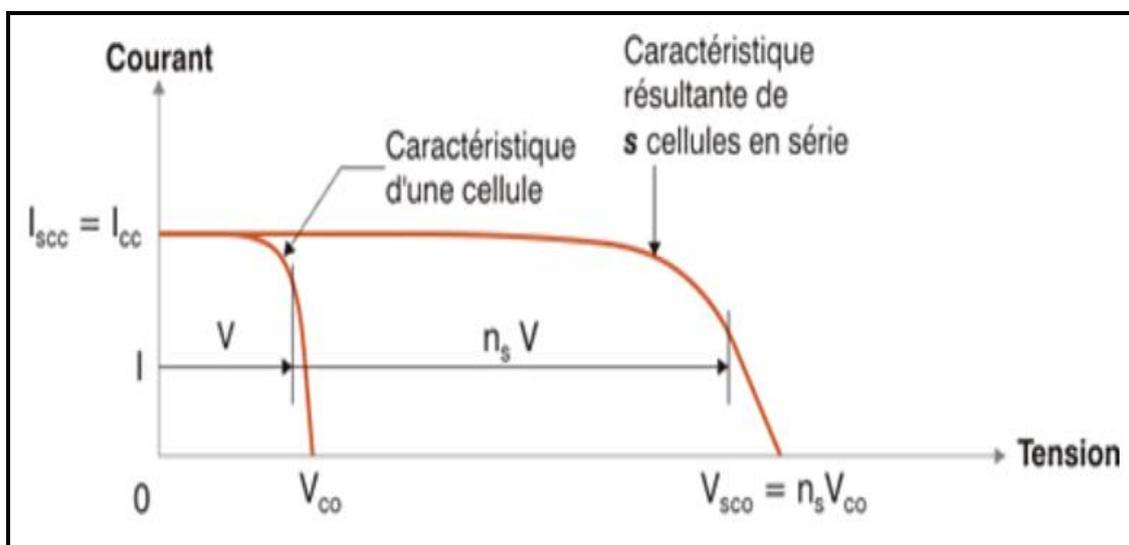


Figure I.10: Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques.

b. Association en parallèle [23] : Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules.

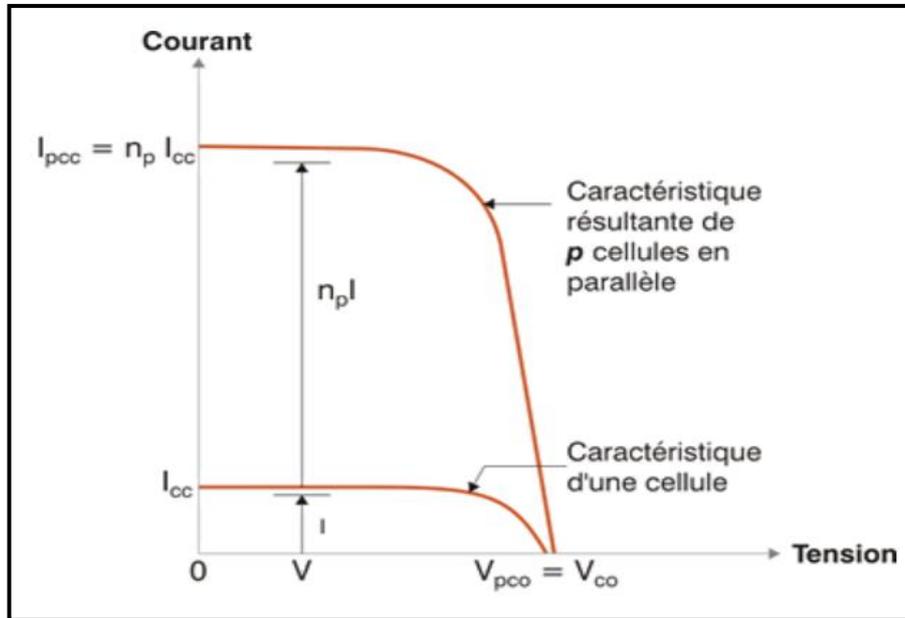


Figure I.11: Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques.

c. Association mixte (en série et en parallèle) [23] : Pour obtenir des puissances de quelques kilowatts avec une tension appropriée, il est nécessaire d'associer plusieurs modules solaires en les connectant en série et en parallèle pour former un générateur photovoltaïque. Ainsi, les caractéristiques globales d'une installation photovoltaïque sont déterminées par la combinaison des caractéristiques des modules individuels ($n_s * n_p$).

Il est important de noter que la configuration en série augmente la tension totale du générateur, tandis que la configuration en parallèle augmente le courant total. En combinant ces deux configurations, on peut obtenir la tension et le courant nécessaires pour répondre aux besoins de l'installation photovoltaïque.

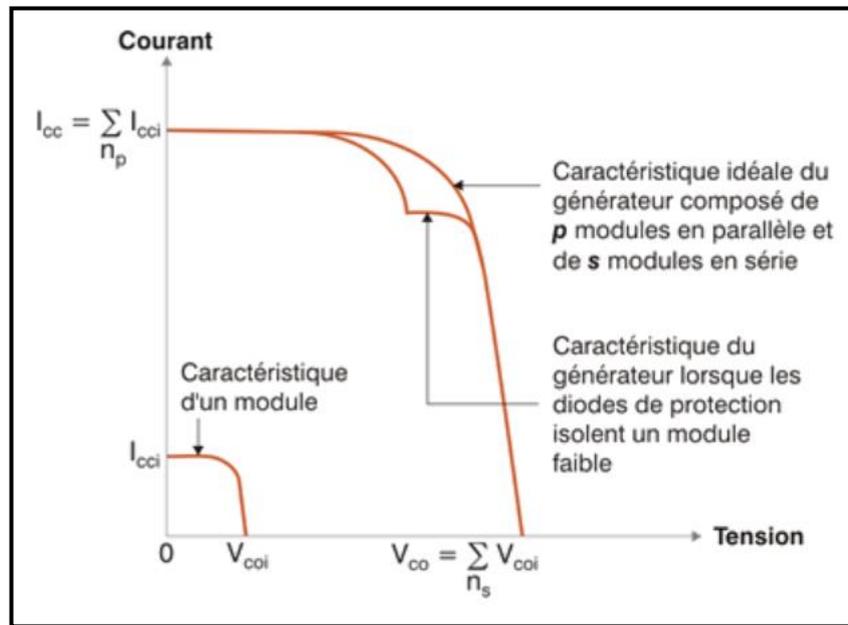


Figure I.12: Caractéristique résultante d'un groupement « en série de n_s et en parallèle de n_p » cellules identiques.

I.4. Descriptions des systèmes photovoltaïques [24]

Les systèmes photovoltaïques (PV) sont des dispositifs qui convertissent l'énergie solaire en énergie électrique utilisable. Ils peuvent être connectés au réseau électrique (on-grid), fonctionner de manière autonome (off-grid), comme illustré dans la figure (I.13), ou être de type hybride, comme représenté dans la figure (I.14) :

a. Systèmes photovoltaïques autonomes : l'énergie électrique produite par les installations PV autonomes est utilisée soit directement par les consommateurs soit stockée dans différents systèmes de stockages tel que les batteries et les supercondensateurs, pour une utilisation ultérieure. Ils sont généralement utilisés dans des régions éloignées et isolées, où l'accès au réseau électrique est limité [24] [25].

b. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau [25] : les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés au réseau électrique, comme illustré dans la figure (I.13), sont le résultat de la tendance croissante vers la décentralisation du réseau électrique. Ils permettent la production d'énergie plus proche des lieux de consommation. Ces systèmes connectés au réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Ils produisent leur propre électricité et peuvent injecter l'excédent d'énergie dans le réseau tout en s'approvisionnant auprès du réseau en cas de besoin. Cette approche élimine le besoin d'acheter et de maintenir une batterie de stockage. De plus, ces systèmes peuvent également servir de source d'alimentation d'appoint en cas de panne du réseau électrique.

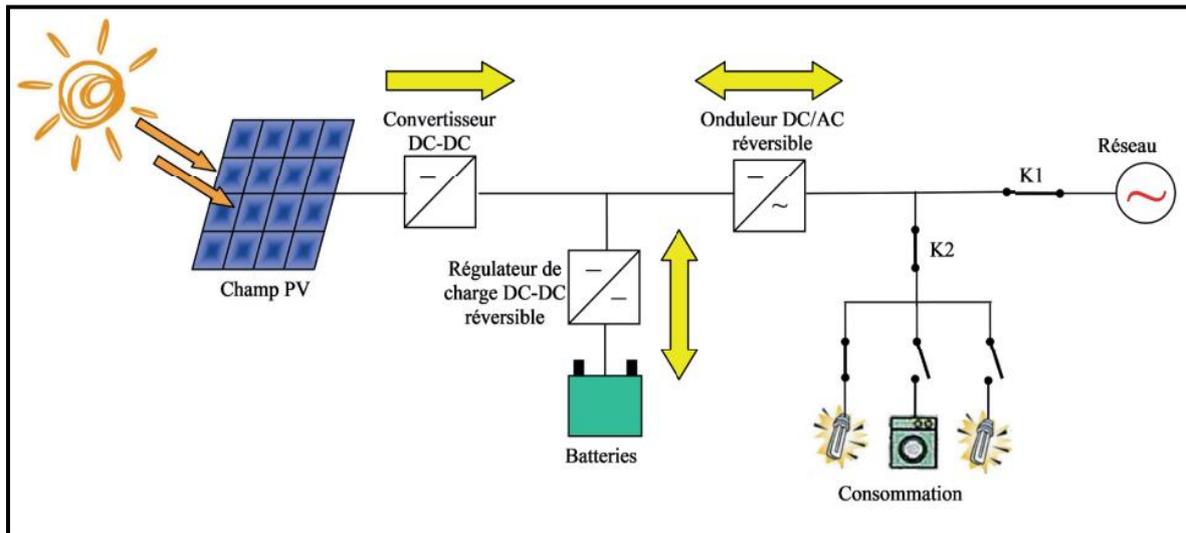


Figure I.13 : Schéma synoptique des installations PV autonomes (Off -grid) et raccordées au réseau électrique (On-grid) [24].

❖ Explication du principe de fonctionnement de système sur la figure précédente (**I.13**) [24] :

- Dans le cas où K1 fermé, K2 ouvert et sans système de stockage, la configuration est dite installation photovoltaïque raccordée au réseau (On-grid). L'énergie produite par le champ PV est totalement injectée dans le réseau électrique.
- Le cas où K1 ouvert, K2 fermé et en présence d'un système de stockage, la configuration est dénommée installation photovoltaïque autonome (Off -grid).
- Une autre configuration qui fait appel à la notion d'autoconsommation correspond à une situation où l'on gère de manière optimale les flux : K1 et K2 fermés. Le système de stockage pourrait être envisagé dans ce cas de figure.

c. Systèmes photovoltaïques hybrides [26] : Les installations photovoltaïques hybrides sont des systèmes de production d'électricité qui combinent l'énergie solaire avec d'autres sources d'énergie (multi sources), généralement, nous choisissons le réseau électrique public comme une deuxième source avec la source photovoltaïque. Lorsque l'énergie produite est insuffisante et que les batteries commencent à se décharger (consommation d'énergie lors de l'absence d'ensoleillement : mode nuit), un système intelligent le détecte (un commutateur automatique : ce dispositif est conçu pour détecter si la source d'énergie PV ne fournit pas une quantité suffisante d'électricité et bascule automatiquement vers une autre source d'alimentation) et met automatiquement en marche par la deuxième source. De cette façon, les panneaux photovoltaïques et le réseau public chargent le même banc de batteries.

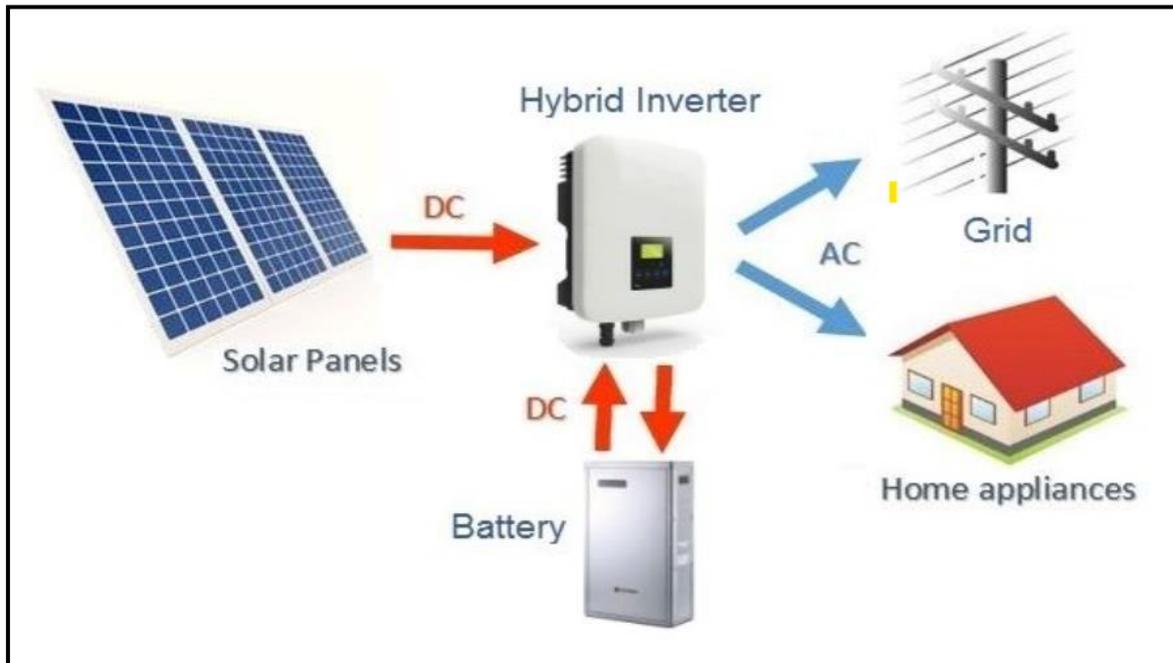


Figure I.14 : Schéma de base d'un système hybride solaire commun (batterie à couplage CC) [26].

- Une installation PV est généralement constituée des éléments suivants [24] :
 1. Générateur PV également appelé champ PV
 2. Régulateur de charge
 3. Système de stockage
 4. Convertisseur statique (DC/DC)
 5. Convertisseur statique (DC/AC)
 6. Coffrets de protection (armoires électriques) (DC/AC)

I.4.1. Le générateur photovoltaïque (GPV) [24]

Le générateur PV est composé d'un ensemble de modules PV constitués de cellules solaires connectées en série et/ou en parallèle. La cellule solaire est l'élément de base permettant de convertir l'énergie solaire en énergie électrique.

Tout module PV est caractérisé par les paramètres électriques suivants :

- Puissance maximale (P_{MAX}) ;
- Tension de circuit ouvert (U_{OC}) ;
- Courant de court-circuit (I_{SC}) ;
- Facteur de forme (FF) appelé aussi facteur d'idéalité ;
- Rendement de conversion.

Ces paramètres sont indiqués dans les fiches techniques fournies par les fabricants des modules PV. Ils sont mesurés en laboratoire sous des conditions standards de tests (STC : $E_s=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$ et $AM=1.5$).

Les caractéristiques du champ PV (puissance, tension et courant) dépendent de celles des modules PV ainsi que de leurs branchements, comme le montre la figure (I.15). En effet, le branchement des modules en série permet d'augmenter la tension du champ PV tandis que le branchement en parallèle sert à augmenter son courant. Ainsi, pour augmenter davantage la puissance, la tension et le courant du champ PV, le branchement série-parallèle des modules est nécessaire.

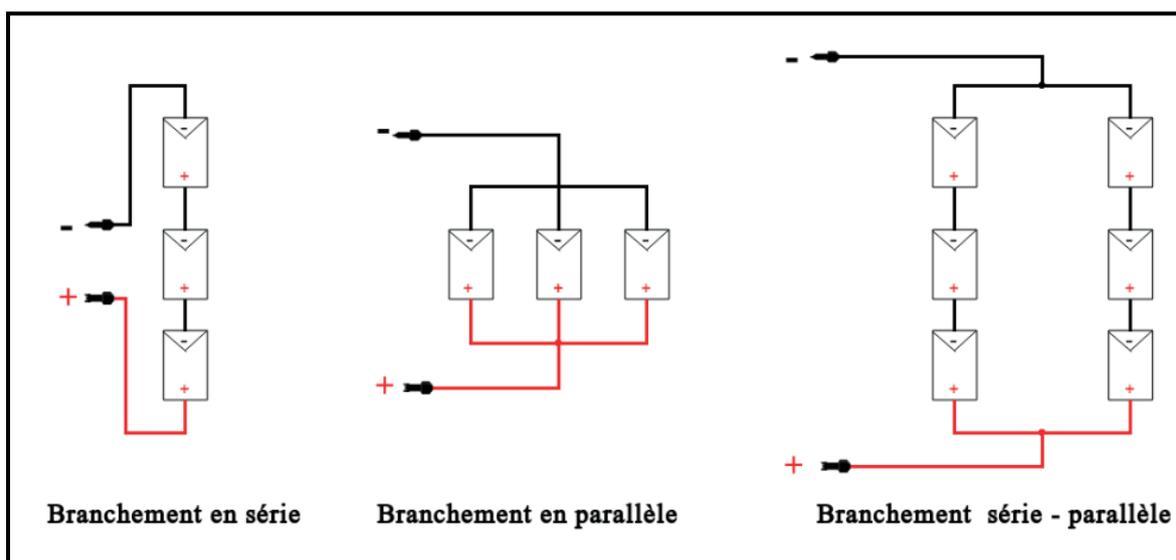


Figure I.15 : Branchements des modules PV.

I.4.2. Le régulateur de charge

Le régulateur de charge (contrôleur de charge) est associé au générateur photovoltaïque GPV et aux batteries, il a pour rôle de contrôler la tension et le courant venant des panneaux solaires vers la batterie, donc il assure la protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes, et l'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation. Sa fonction est primordiale car elle a un impact direct sur la durée de vie de la batterie [27].

Tout régulateur de charge est caractérisé par [24] :

- Une puissance, une tension et un courant du champ PV admissibles en entrée ;
- Une tension et un courant de charge des batteries ;
- Un rendement. Afin d'améliorer le rendement de l'installation PV, il est conseillé de choisir des régulateurs dotés de la fonction MPPT.

I.4.2.1. Principe de fonctionnement de régulateur MPPT

Le MPPT, ou « Maximum Power Point Tracking », est un principe qui consiste à suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale (PPM) d'un générateur électrique non linéaire. Cela signifie que, pour un même niveau d'éclairement, la puissance fournie sera différente en fonction de la charge. Un contrôleur MPPT est utilisé pour piloter le convertisseur statique qui relie la charge et le panneau photovoltaïque, de manière à fournir en permanence la puissance maximale à la charge à chaque instant [28].

I.4.3. Système de stockage [29]

Le stockage de l'énergie électrique est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. L'opération de stockage d'énergie est toujours associée à l'opération inverse consistant à récupérer l'énergie stockée (le déstockage). Ces deux opérations de stockage/déstockage constituent un cycle.

Il existe plusieurs types de formes de stockages de l'énergie électrique tel que le stockage : chimique, thermique, électrochimique et électromagnétique ..., le développement technologique aujourd'hui désigne les types de stockages les plus utilisées dans les installations photovoltaïques :

- Les batteries
- Supercondensateurs/Ultra-condensateurs

I.4.3.1. Les batteries

Une batterie est constituée de multiples cellules individuelles qui sont des unités autonomes et complètes, avec toutes les caractéristiques électrochimiques nécessaires pour le stockage d'énergie. Lorsqu'elles sont regroupées dans un module, on les appelle une batterie, qui est conçue spécifiquement pour fournir une tension plus élevée aux bornes du dispositif [30].

Toute installation PV autonome est caractérisée par sa durée d'autonomie durant laquelle le système PV continue de satisfaire les besoins énergétiques du consommateur sans interruption, et ce pendant la période où le champ PV ne produit plus d'énergie notamment en raison de l'absence de l'ensoleillement. L'autonomie d'une installation solaire dépend des caractéristiques du banc de batteries tels que sa tension et sa capacité nominales. La capacité est le paramètre indiquant la quantité d'énergie pouvant être stockée dans une batterie. Les

caractéristiques du parc de batteries dépendent de la configuration et des spécifications des batteries qui le composent, comme l'illustre la Figure (I.16). La batterie est aussi caractérisée par son type, sa durée de vie, son rendement et sa profondeur de décharge [24].

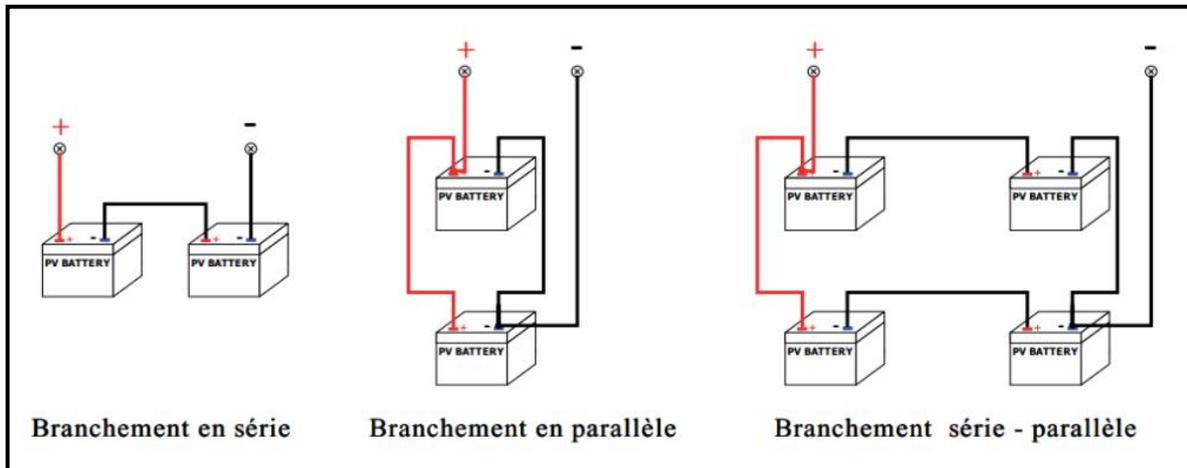


Figure I.16 : Différents modes de branchements des batteries [24].

I.4.3.1.1 Connexions des batteries

a. Branchement série [24] : Lorsque les batteries sont connectées en série, la tension totale du parc de batteries est égale à la somme des tensions individuelles des batteries, tandis que sa capacité reste la même que celle d'une seule batterie.

b. Branchement parallèle [24] : lorsque les batteries sont branchées en parallèle, la capacité du parc de batteries est la somme des capacités de toutes les batteries tandis que sa tension est égale à la tension, mesurée aux bornes d'une seule batterie.

c. Branchement série – parallèle [24] : ce branchement, permet quant à lui d'augmenter à la fois la tension du parc de batteries et sa capacité.

I.4.3.1.2. Types de batteries (électrochimiques)

Différents types de batteries sont disponibles avec des caractéristiques variées et peuvent être utilisées pour diverses applications :

a. Batteries à base de Nickel [31] : Cette batterie est constituée d'une électrode en nickel (Ni) et d'un électrolyte de cadmium (Cd). Elle présente certains avantages, tels que des cycles de décharge rapides, un faible coût par cycle et une longue durée de vie. Cependant, elle présente également quelques inconvénients significatifs, tels que la toxicité du cadmium, un effet de mémoire potentiel qui peut affecter sa capacité, une forte exothermie (en particulier

pour les batteries nickel-hydrure métallique - NiMH), un coût élevé et la nécessité d'une maintenance régulière.

b. Batteries Sodium-Soufre (Na-S) [31] : Cette technologie est relativement récente. Elle utilise une anode de sodium (Na), une cathode de soufre (S) et un électrolyte céramique de bêta-Al₂O₃. Les principaux avantages de cette batterie comprennent une excellente densité d'énergie et une densité de puissance très élevée. Cependant, la principale limitation de la batterie NaS est qu'elle nécessite une source de chaleur qui utilise l'énergie stockée dans la batterie, ce qui réduit partiellement ses performances. De plus, le coût initial de l'investissement reste un autre problème majeur à surmonter.

c. Batteries à base de Lithium : Ce type de batterie est largement utilisé dans l'industrie de l'électronique portable et dans le secteur des transports. Des recherches récentes sont en cours pour développer ces batteries à grande échelle, afin de les utiliser dans les réseaux électriques et les systèmes hybrides. Elles sont également considérées comme le choix précurseur pour les futurs véhicules électriques. Les batteries au lithium offrent plusieurs avantages, notamment une densité énergétique élevée, une capacité de décharge/charge rapide, un rendement élevé et un poids léger. Cependant, les chercheurs doivent encore relever des défis tels que l'emballage thermique, l'instabilité à des températures de fonctionnement élevées et l'autodécharge [31]. Son principe de fonctionnement est basé sur l'échange entre les électrodes d'ions lithium accompagné d'un mouvement des électrons [32].

d. Batteries à flux [33] : Elles se caractérisent par une structure très souple comportant deux solutions électrolytiques distinctes, qui sont stockées à l'extérieur et peuvent réagir à l'intérieur de la batterie pour générer la mobilité des électrons. L'électrolyte peut être pompé à l'intérieur et à l'extérieur de la batterie à l'aide de pompes hydrauliques où il subit des réactions pour libérer des électrons. Les deux cotés positif et négatif de la batterie sont séparés au moyen d'une membrane sélective des ions pour permettre leur mobilité. Ce type présente les avantages suivants : une longue durée de vie avec un bon rendement, ce qui en fait le meilleur choix pour le stockage d'énergie à grande échelle. Par contre, le principal inconvénient de ce type est la faible densité d'énergie et le coût élevé.

e. Batterie au plomb [33] : une batterie au plomb est constituée de cellules appelées accumulateurs délivrant une tension de 2,1 Volts. Elles comprennent 6 accumulateurs disposés en séries qui délivrent ainsi une tension totale de 12,6 Volts. Un accumulateur est un ensemble de plaques (positives et négatives) immergées dans une substance acide appelée électrolyte

(mélange eau acide Sulfurique). Durant la décharge les plaques positives subissent une « réduction » c'est à dire qu'elles consomment des électrons et les plaques négatives libèrent des électrons (réaction d'oxydation). Le phénomène inverse se produit pendant la charge.

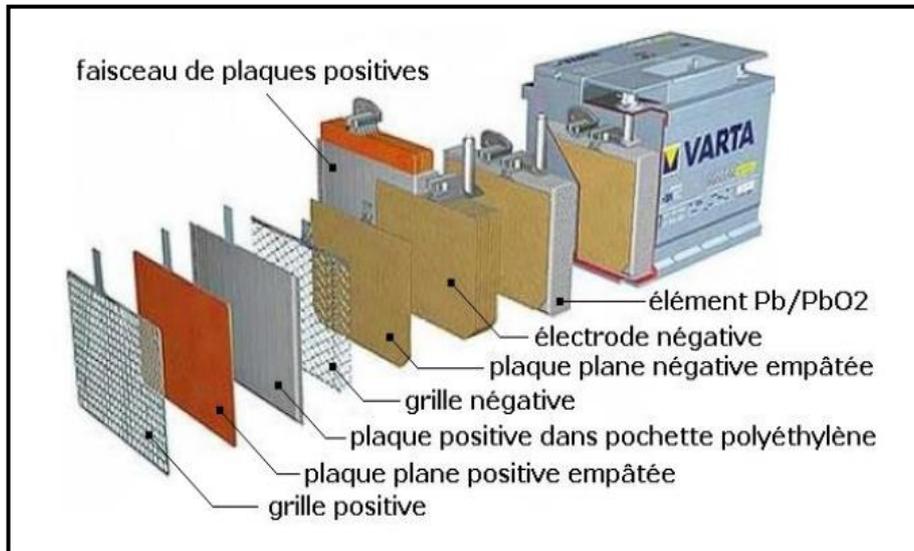


Figure I.17 : Batterie d'accumulateur au plomb [35].

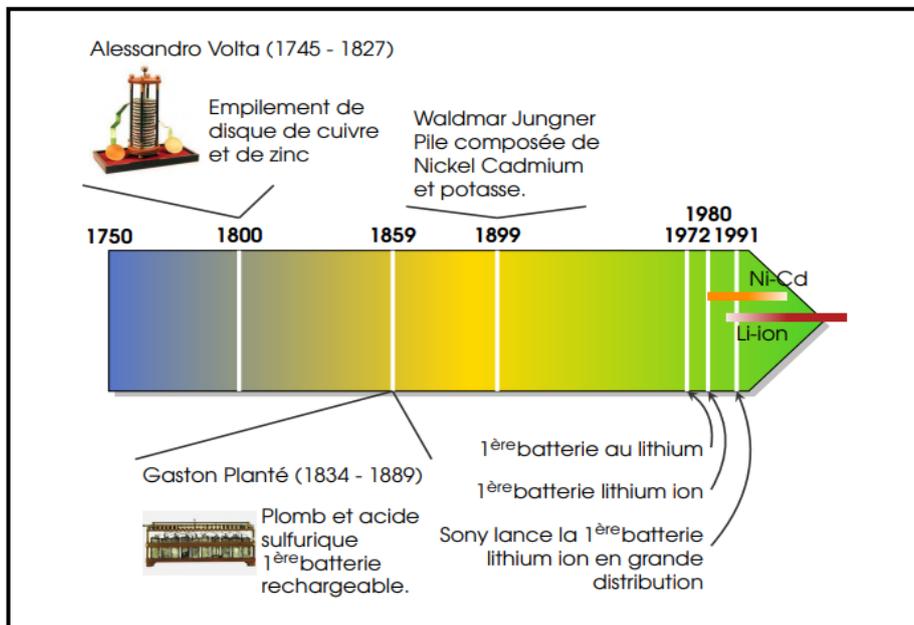


Figure I.18 : Les batteries dans l'histoire [32].

I.4.3.2. Supercondensateurs/Ultra-condensateurs [36]

Les supercondensateurs (SC) sont des dispositifs similaires à de grands condensateurs, mais avec une solution d'électrolyte située entre deux conducteurs solides. Ils se distinguent des condensateurs conventionnels par leur capacité et leur densité d'énergie nettement supérieures.

Les SC sont capables de stocker ou de libérer de l'énergie en grande quantité en peu de temps. Parmi les avantages des SC, on peut citer :

- Stabilité du cycle ;
- Densité de puissance extrêmement élevée ;
- Charge et décharge très rapides ;
- Ne nécessite pas de maintenance ;
- Longue vie ;
- Fonctionnement sur une large plage de températures.

Ces avantages en font une option intéressante pour les applications liées à la qualité de l'énergie et aux véhicules électriques. Le principal inconvénient des supercondensateurs est similaire à celui des volants d'inertie, ils souffrent également d'autodécharge et ne conviennent pas aux applications exigeant un stockage d'énergie prolongé.

I.4.4. Convertisseur statique DC/DC (Hacheur)

Les convertisseurs statiques DC/DC, appelés aussi hacheurs, sont souvent utilisés dans les systèmes photovoltaïques comme interface d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et sa charge. Ils permettent de commander le flux d'énergie générée par les GPV et d'assurer la poursuite du point de puissance maximale en suivant des stratégies de contrôle spécifiques [37]. On distingue trois types de convertisseurs continu-continu non isolés [38] :

- Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels $V_o < V_i$;
- Les élévateurs (BOOST) dans lesquels $V_o > V_i$;
- Abaisseur-élévateur (BUCK-BOOST), mélange entre les deux précédents qui comportent plusieurs topologies.

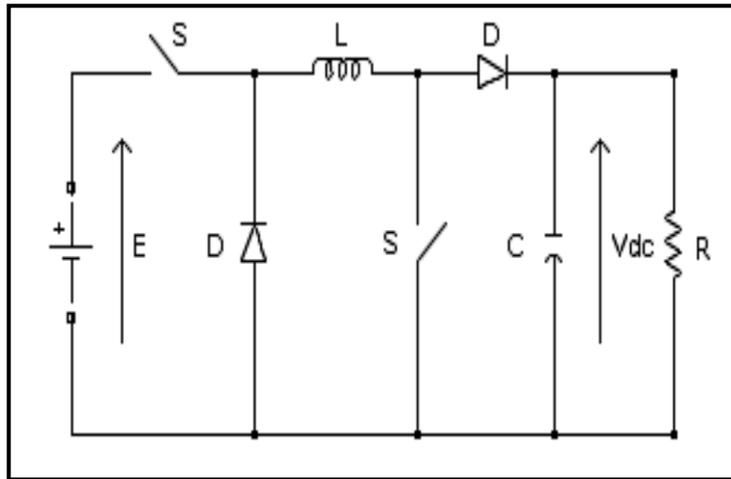


Figure I.19 : Schéma de principe du convertisseur DC/DC (BUCK/BOOST) [39].

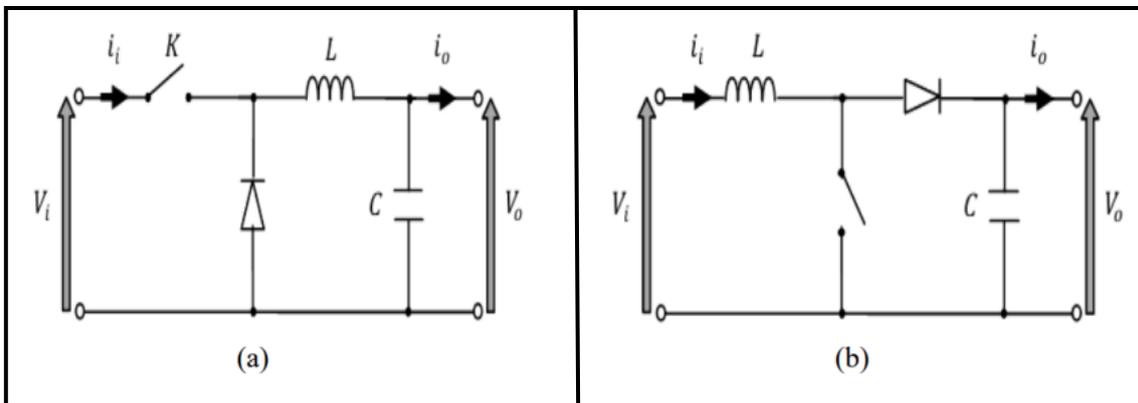


Figure I.20 : Schéma de principe du convertisseur DC/DC ((a) : BUCK ; (b) : BOOST) [38].

I.4.5. Convertisseur statique DC/AC (Onduleur)

L'onduleur solaire, connu également sous le nom de convertisseur DC/AC, est un dispositif électronique essentiel dans les systèmes photovoltaïques. Il permet de convertir le courant continu (DC), généré par le système PV, en courant alternatif (AC). En général, l'onduleur est associé à un « **redresseur** », qui joue un rôle important dans les installations photovoltaïques. Le redresseur a pour fonction de transformer le courant alternatif (AC) en courant continu (DC). Il se charge de charger les batteries et d'alimenter les charges qui fonctionnent en courant alternatif. Ainsi, l'onduleur et le redresseur travaillent conjointement pour assurer une conversion efficace et un bon fonctionnement du système PV, permettant ainsi l'utilisation de l'énergie solaire de manière optimale [39].

Tout onduleur solaire de type OFF-gride (dédié aux installations solaires autonomes) ou On-gride (dédié aux installations solaires raccordées au réseau avec possibilité d'injection.) est caractérisé par [24] :

- Une puissance, une tension et un courant admissibles en entrée DC ;
- Une puissance, une tension, une fréquence et un courant en sortie AC ;
- Un rendement de conversion.

I.4.6. Les armoires de protection et de distribution DC & AC [24]

Toute installation photovoltaïque doit être munie d'un système de protection contre d'éventuels risques électriques afin d'assurer la sécurité, la distribution de l'énergie, la surveillance, le contrôle et la facilité de maintenance du système.

Dans cette optique, il est nécessaire de prévoir des armoires (coffrets) de protection contre les surintensités et les surtensions à la fois dans la partie du système en courant continu (DC) et dans la partie du système en courant alternatif (AC).

Le coffret DC et le coffret AC sont installés respectivement en amont et en aval de l'onduleur.

Le coffret de protection DC est essentiellement constitué de :

- Fusibles solaires DC spécifiques aux installations PV (portant le marquage PV)
- Interrupteur
- Sectionneur DC
- Parafoudre DC

Le coffret de protection AC est constitué de :

- Disjoncteur différentiel
- Interrupteur
- Sectionneur AC
- Parafoudre AC.

Outre les coffrets DC/AC principal, installés au plus près de l'onduleur DC/AC, les installations PV peuvent également contenir de :

- Boite(s) de jonction et de raccordement des chaînes PV et/ou des groupes PV avec :
 1. Fusibles solaires DC spécifiques aux installations PV

2. Interrupteur
 3. Sectionneur DC
 4. Parafoudre DC
- Coffret de protection des batteries avec :
 1. Fusibles DC
 2. Sectionneur ou interrupteur-Sectionneur.

I.5. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Les principaux avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque sont décrits dans le tableau suivant [41] [18] :

Avantages	Inconvénients
Système fiable et source d'énergie gratuite.	Grande surface nécessaire à l'installation.
Production d'énergie au plus près du consommateur.	Nécessité d'un système de stockage.
Faible cout d'exploitation et de maintenance et faible impact environnemental.	La haute technologie d'étude et de fabrication.
Energie écologique sans bruit.	Influence des conditions météorologique sur leur production
Hautement disponible.	Cout élevé.

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients des systèmes solaires photovoltaïques.

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïque : les différents types de panneaux solaires, les définitions des différents type de systèmes photovoltaïques (systèmes autonomes : système autonome sans batterie, système autonome avec batterie, systèmes hybrides, système PV connecté au réseau électrique), la technologie des cellules photovoltaïque ainsi que leur associations, le système de protection et de distribution coté DC et AC d'un système photovoltaïque.

Par définition du principe de l'énergie solaire et de l'énergie photovoltaïque ainsi que son principe de fonctionnement et de l'exploitation, nous concluons que l'énergie photovoltaïque a ses avantages mais aussi quelques inconvénients.

Chapitre II :
Modélisation du système photovoltaïque

II.1 Introduction

Grâce à une méthode appelée « la modélisation », il est possible de représenter abstraitement un système réel ou un processus en utilisant des algorithmes, des graphiques ou d'autres formes de représentation mathématique ou informatique. Cette méthode vise à optimiser la conception et la performance des systèmes ou des modèles spécifiques, à comprendre, prédire et évaluer le comportement des systèmes réels.

La simulation d'un système photovoltaïque sur (MATLAB/SIMULINK) est une technique de modélisation majeure qui permet de prévoir les performances, le dimensionnement, l'optimisation et la production d'un système PV de manière optimal avant sa mise en place, pour assurer une production suffisante et efficace d'énergie solaire, pour répondre aux besoins du site et qu'il sera stable et performant dans des conditions réelles.

II.2. Inventaire des composants du système à étudié

Notre système photovoltaïque autonome muni de batteries de stockage, est constitué du :

- **GPV (générateur photovoltaïque)** : il est composé d'un ou plusieurs panneaux solaires photovoltaïques.
- **Convertisseur DC-DC (hacheur Boost)** : parmi ses principales spécifications l'adaptation de la tension de sortie des panneaux PV à la tension de la charge.
- **Convertisseur DC-DC (hacheur Buck/Boost)** : utilisé pour l'adaptation et la régulation de la tension, la maximisation de l'efficacité et l'isolation galvanique entre les batteries et le bus continu.
- **Convertisseurs DC-AC (onduleur)** : principalement utilisé pour une conversion « continu/alternative » afin d'alimenter des charges alternatives.
- **Modèle « CIEMAT »** : est un système de stockage de l'énergie électrique.
- **Bus continu** : est la tension de référence qui assure la cohérence et la stabilité du flux d'énergie dans notre installation photovoltaïque. Sa valeur (12V, 24V, 48V ou autres) est déterminée en fonction des besoins spécifiques du système et de la taille de l'installation.

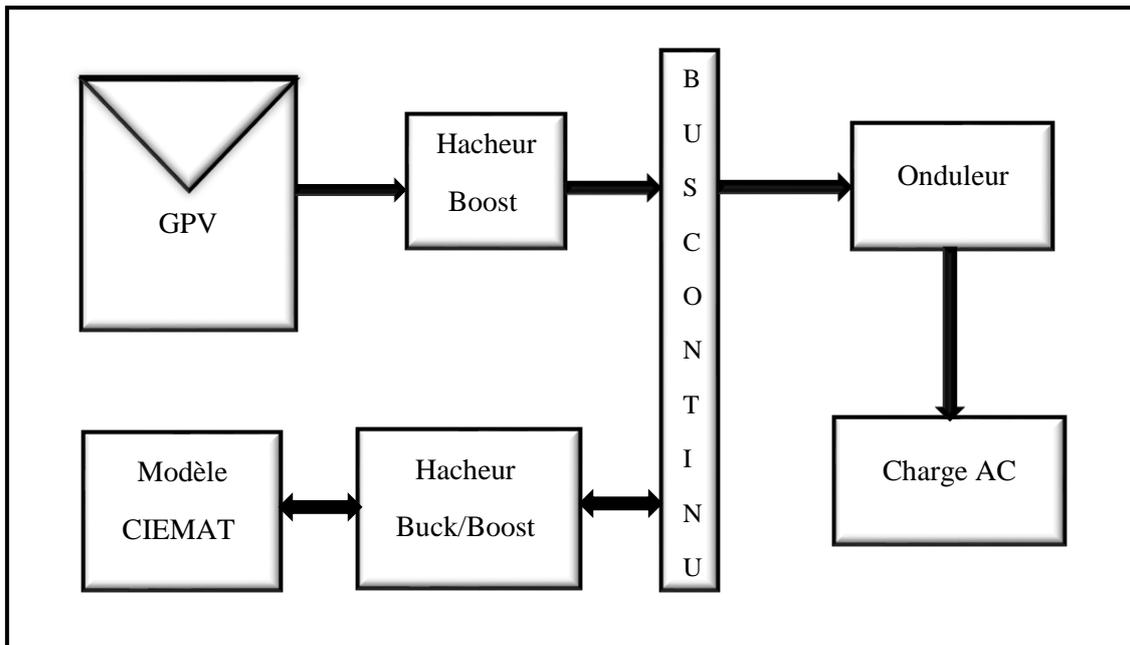


Figure II.1 : Structure de système à étudié.

II.3. Modélisation mathématique

II.3.1. Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV) [42] :

Dans le cadre de l'optimisation du générateur photovoltaïque et pour mieux utiliser l'énergie produite par ce dernier, on doit adapter la caractéristique tension-courant $I_{PV}(V_{PV})$ du générateur photovoltaïque au point de fonctionnement de la charge utilisée. Pour avoir le point optimal qui correspond au point de la puissance maximale, il est évident de modéliser le générateur photovoltaïque. Dans la littérature ; il existe plusieurs modèles mathématiques qui décrivent le fonctionnement et le comportement du générateur photovoltaïque. Parmi ces modèles nous citons :

II.3.1.1 Modèle idéal :

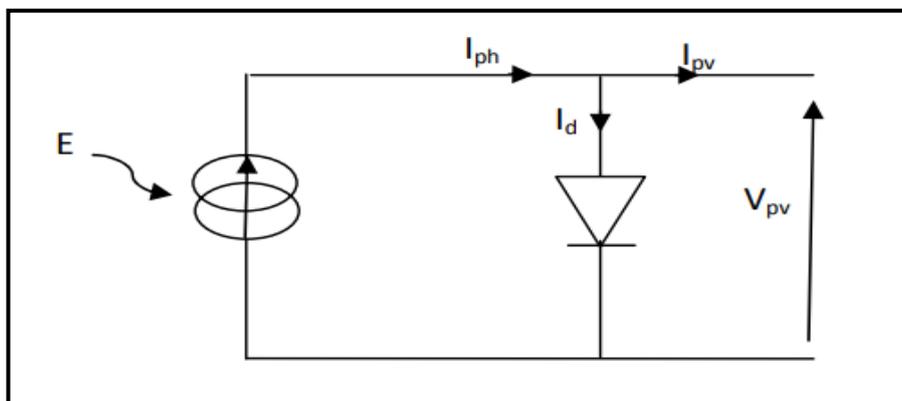


Figure II.2 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale [42].

$$I = I_{ph} + I_d \quad (II.1)$$

$$I_d = I_s \cdot e^{\left(\frac{qV}{AKT_c} - 1\right)} \quad (II.2)$$

Avec :

I : Courant disponible.

I_{ph} : Courant produit par la photopile.

I_d : Le courant de diode.

V : Tension aux bornes de la cellule.

$\frac{KT}{q} = 26 \text{ mV}$ à « **T_c = 300 °K** » pour le silicium poly-cristallin.

I_s : Courant de polarisation de la diode ou courant de saturation.

II.3.1.2. Modèle à une diode [40] :

Le modèle à une diode est largement employé, offrant une grande précision. Cette modélisation inclut un générateur de courant pour représenter la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique.

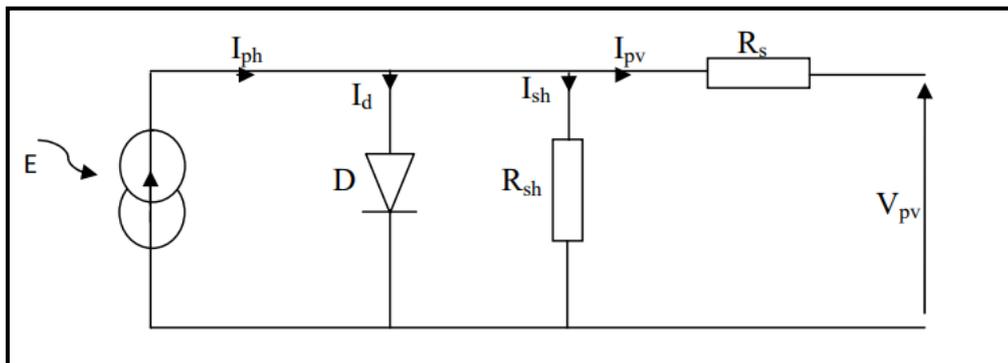


Figure II.3 : Schéma électrique équivalent du modèle à une diode.

➤ La loi de Kirchhoff détermine le courant engendré par le module :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.3)$$

Avec :

I_{pv} : Le courant délivré par le module.

I_{ph} : Photon courant.

I_d : Courant de diode.

I_{sh} : Le courant shunt.

➤ Le courant produit par la photopile est donné par :

$$I_{ph} = P_1 \cdot E [1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{cref})] \quad (II.4)$$

Avec :

E_{ref} : Ensoleillement de référence.

T_c : Température absolue de la cellule.

T_{cref} : Température de référence.

➤ Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_s \cdot e^{\left(\frac{q(V + R_s I_{pv})}{An_s K T_j} - 1 \right)} \quad (II.5)$$

Avec :

$$I_d = P_4 T_c^3 \cdot e^{\left(\frac{E_g}{K T_c} \right)} \quad (II.6)$$

Avec :

$$E_g = 1.1 \text{ eV}$$

E_g : L'énergie de gap (paramètre caractéristique du matériau, pour le Silicium).

I_s : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité.

➤ Le courant de la résistance shunt est donné par :

$$I_{sh} = \left(\frac{V + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \right) \quad (II.7)$$

Tel que :

R_s : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contacte).

R_{sh} : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

D'où l'expression de la caractéristique courant-tension (I-V) qui est donnée par l'équation suivante :

$$I_{pv} = P_1 \cdot E [1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{cref})] - P_4 T_c^3 \cdot e^{\left(\frac{E_g}{KT_c}\right)} \cdot e^{\left(\frac{q(V + R_s I_{pv})}{An_s KT_j} - 1\right)} - \left(\frac{V + R_s I_{pv}}{R_{sh}}\right) \quad (II. 8)$$

II.3.1.3. Modèle à deux diodes [42] :

Ce modèle est caractérisé par son schéma électrique équivalent qui comprend différents composants. Une source de courant représente le flux lumineux, tandis que les pertes sont représentées par deux résistances. Une résistance shunt (R_{sh}) et une résistance série (R_s) sont utilisées pour modéliser ces pertes. De plus, deux diodes sont présentes pour représenter la polarisation de la cellule et le phénomène de recombinaison des porteurs minoritaires.

L'avantage de ce modèle c'est qu'il établit en appliquant seulement des simples données (données standard).

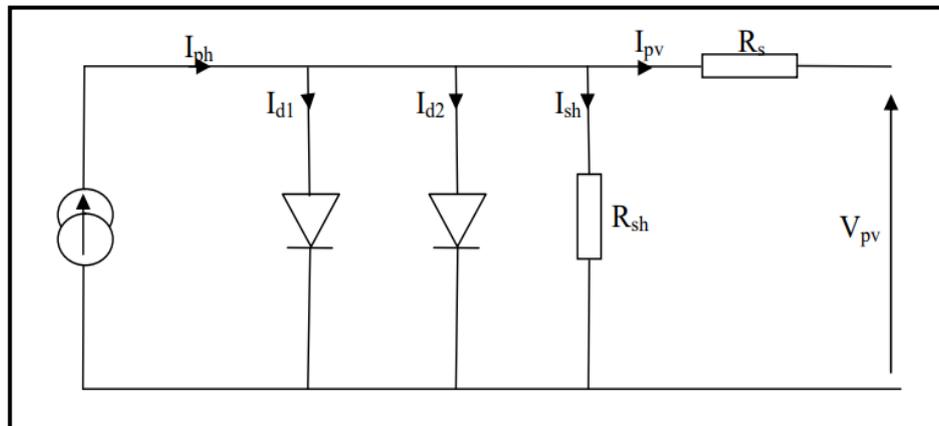


Figure II.4 : Schéma électrique équivalent du modèle deux diodes.

➤ La loi de Kirchhoff détermine le courant engendré par le module :

$$I_{pv} = P_1 \cdot E [1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{cref})] - P_4 T_c^3 \cdot e^{\left(\frac{E_g}{KT_c}\right)} \cdot e^{\left(\frac{q(V + R_s I_{pv})}{An_s KT_j} - 1\right)} - P_5 T_c^3 \cdot e^{\left(\frac{E_g}{2KT_c}\right)} \cdot e^{\left(\frac{q(V + R_s I_{pv})}{An_s KT_j} - 1\right)} - \left(\frac{V + R_s I_{pv}}{R_{sh}}\right) \quad (II. 9)$$

- Ces modèles se différencient par la procédure de calcul, la précision et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de cette caractéristique. Dans notre travail, nous avons retenu le modèle à une diode simplifié qui donne de très bonnes performances, et nous avons utilisé le panneau « **AS R04-280PERC** » (300 Wc).

- Le tableau (II.1) illustre les paramètres électriques de panneaux utilisés dans les conditions standards ($E_s = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_c = 25^\circ\text{C}$) :

Paramètres	Valeurs
Puissance nominale P_{mp} ($P_{max} \pm 2\%$)	300
Tension a puissance max. V_{mp} (V)	33.52
Courant a puissance max. I_{mp} (A)	9.19
Tension en circuit ouvert V_{oc} (V)	39.56
Courant de court-circuit I_{sc} (A)	9.51
Quantité de cellules	60
Tension maximale système (V)	1000/1500
Maximum courant inverse (A)	15

Tableau II.1 : Paramètres électriques de panneau « AS R04-280PERC » [43].

- Par la modélisation et la simulation du module PV « AS R04-280PERC » de 300 Wc, sur MATLAB SIMULINK, nous avons obtenu les caractéristiques électriques courant-tension $I_{pv}(V_{pv})$ et puissance-tension $P_{pv}(V_{pv})$, pour un éclairement et une température donnée dans les conditions STC ($E_s = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$), représentée sur les figures (II.6) et (II.7) :

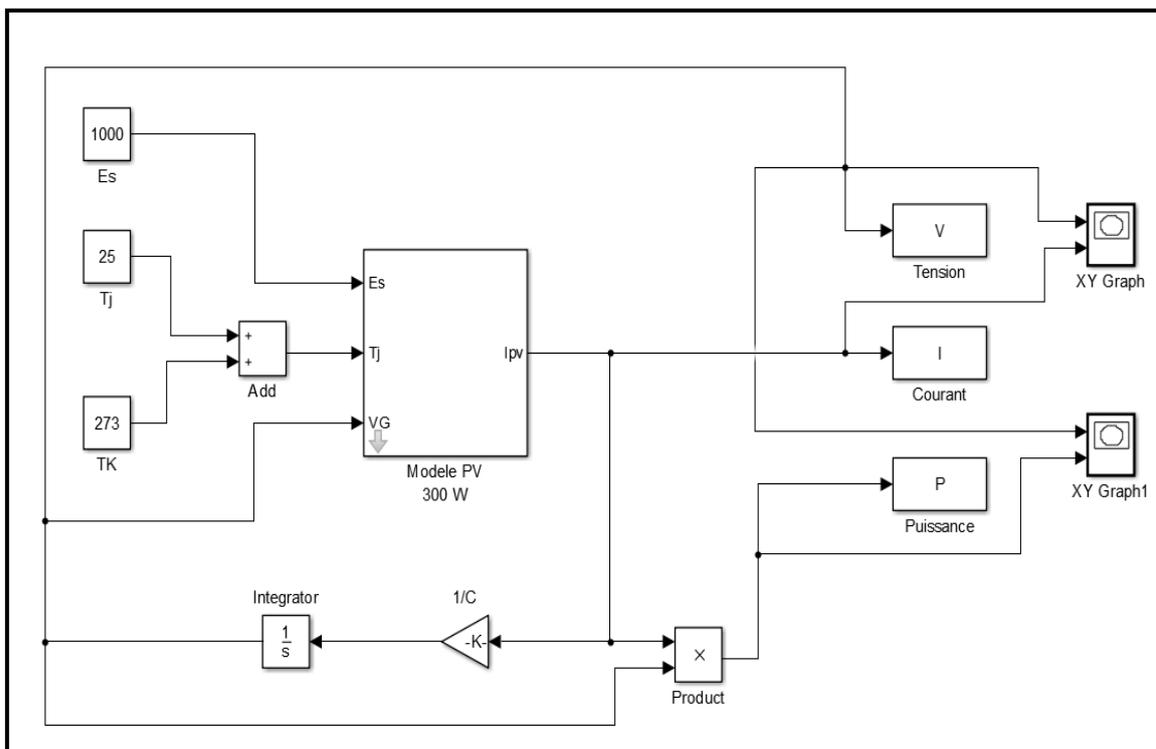


Figure II.5 : Schéma bloc du module PV réalisé sur MATLAB SIMULINK.

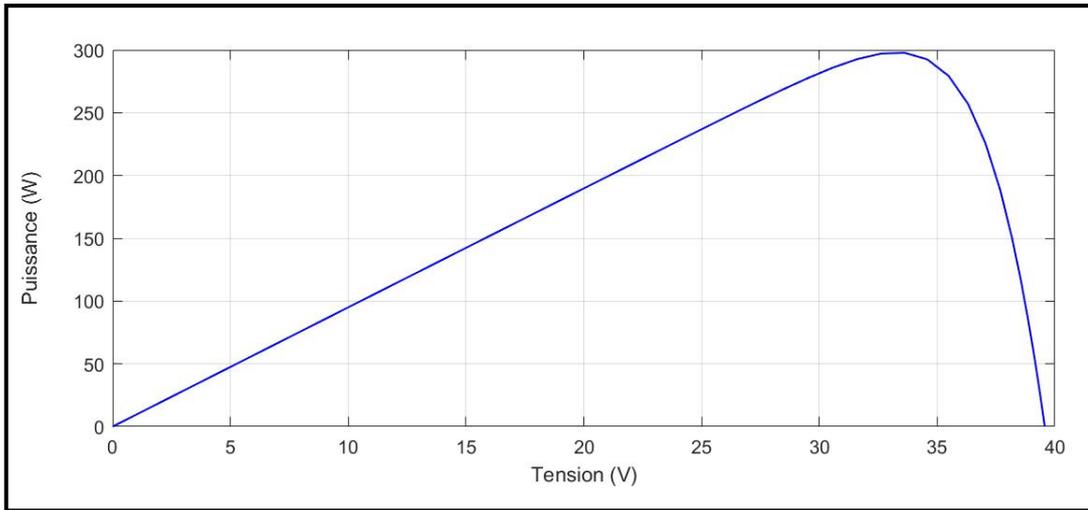


Figure II.6 : Caractéristique Ppv(Vpv) .

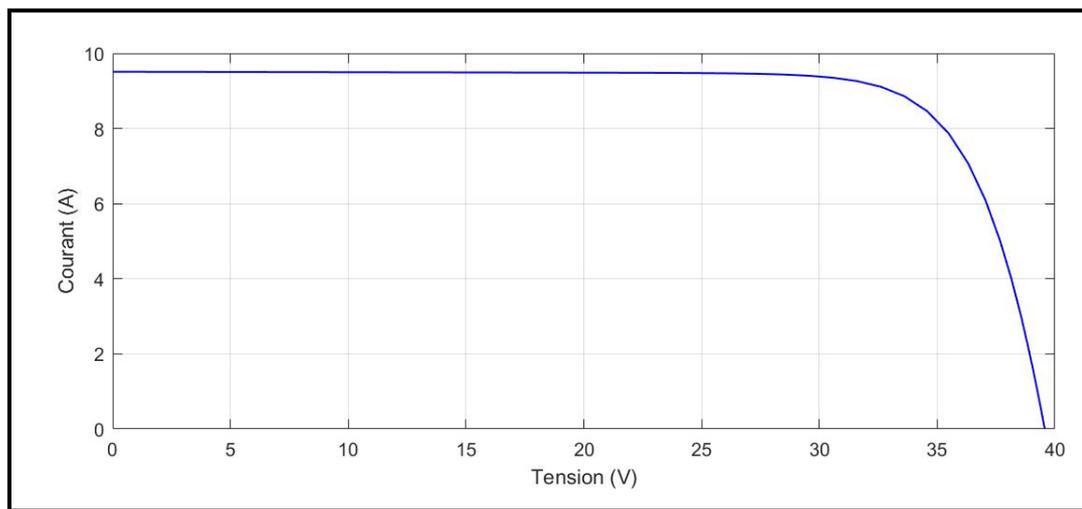


Figure II.7 : Caractéristique Ipv(Vpv).

II.3.1.4. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV

Nous avons procédé à une simulation de notre modèle en variant l'intensité de l'irradiation à température constante, ainsi qu'en modifiant la température à irradiation constante. Ceci nous a permis d'étudier les variations des caractéristiques courant-tension et puissance-tension.

Les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque, sont obtenus sans l'application d'un algorithme d'optimisation (MPPT), pour différentes variations d'ensoleillement et de température.

II.3.1.4.1. Influence de l'ensoleillement

Sous une température fixe ($T=25^{\circ}\text{C}$), et différentes valeurs d'ensoleillement, nous allons tracer les caractéristiques $P_{PV}(V_{PV})$ et $I_{PV}(V_{PV})$ afin d'observer l'influence de l'ensoleillement sur notre GPV.

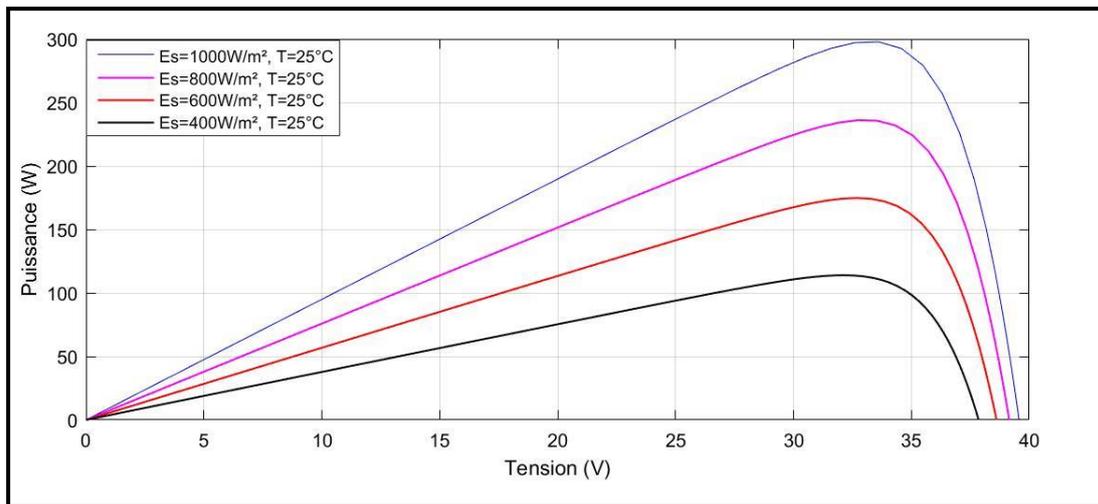


Figure II.8 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$.

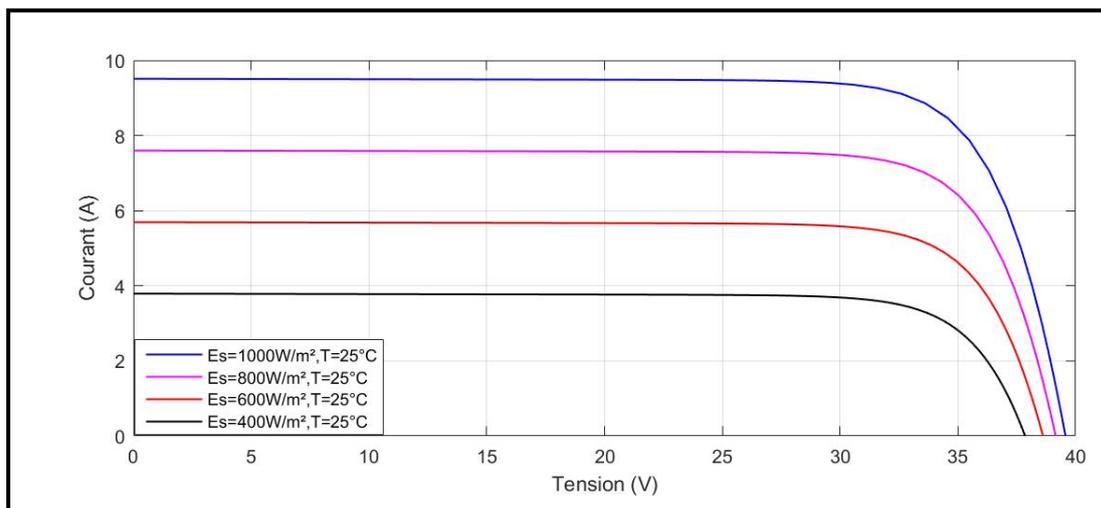


Figure II.9 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$.

II.3.1.4.2. Influence de la température :

Sous une valeur fixe d'ensoleillement ($E_s=1000\text{W/m}^2$), et différentes valeurs de températures, nous allons tracer les caractéristiques $P_{pv}(V_{pv})$ et $I_{pv}(V_{pv})$ afin d'observer l'influence de la température sur notre GPV.

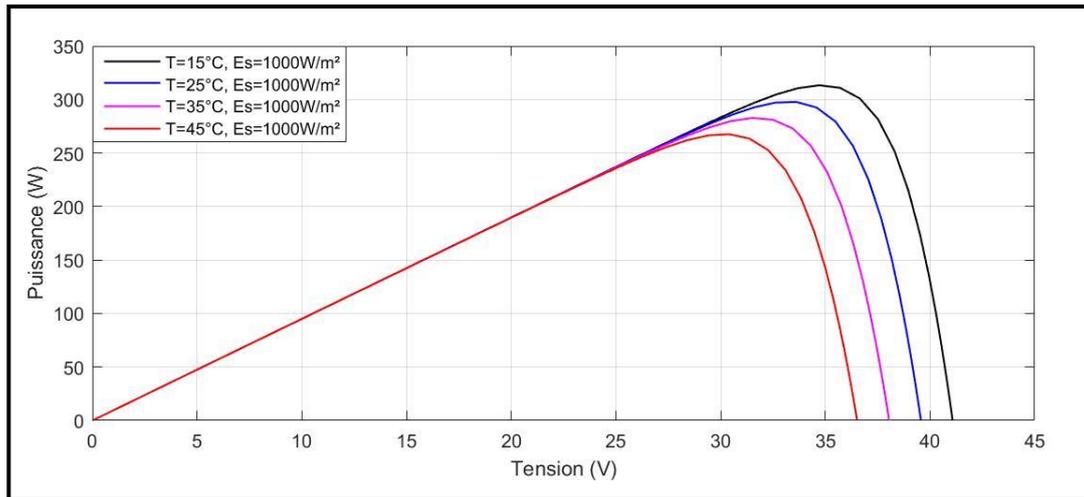


Figure II.10 : Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$.

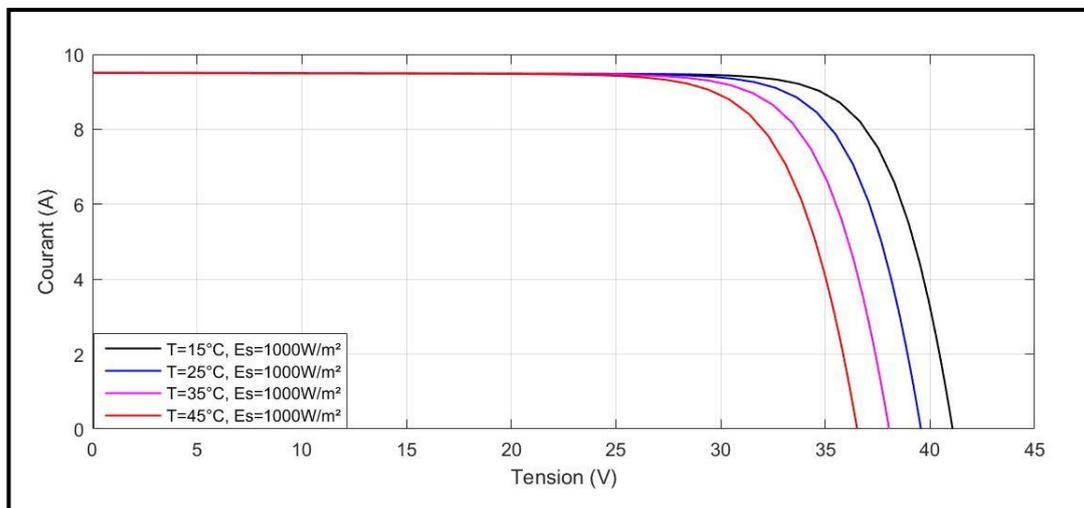


Figure II.11 : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$

- **Discussion des résultats**
- **Influence de l'ensoleillement**

A une température (T_c) constante, l'ensoleillement (E_s) varie. Les courbes obtenues sont illustrés dans les figures (II.8) et (II.9).

On remarque que :

1. La diminution de l'éclairement entraîne une forte réduction de la valeur du courant de court-circuit (I_{cc}), tandis que la tension de circuit ouvert (V_{oc}) subit une légère diminution.
2. Une diminution de l'ensoleillement entraîne une chute instantanée du point de puissance optimale.
3. Que le courant produit par la photopile (I_{ph}) est pratiquement proportionnel à l'éclairement solaire E . Par contre, la tension aux bornes de la jonction

varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction N-P du matériau lui-même.

➤ Influence de la température

Les figures (II.10) et (II.11) représentent les courbes obtenues en faisant varier la température, tout en maintenant une valeur constante ($E_s = 1000\text{W/m}^2$).

On observe que :

1. La dépendance de la température entre le courant de court-circuit (I_{cc}) et la tension de circuit ouvert (V_{oc}) dans un générateur photovoltaïque (PV), En effet, le courant de court-circuit (I_{cc}) présente une faible dépendance par rapport à la température qui est presque constant pour toutes les valeurs de température simulé, tandis que la tension de circuit ouvert (V_{oc}) est très sensible aux variations la température, sachant que chaque augmentation de la température entraine diminution de tension de circuit ouvert (V_{oc}), et vice versa.
2. La puissance optimale fournie par notre générateur photovoltaïque va dans le sens inverse de la température.

II.3.2. Modélisation des convertisseurs [44]

L'objectif principal de l'architecture proposée est de maximiser la puissance produite par les sources. A cet effet, chacune est connectée à un convertisseur de puissance qui ajuste son point de fonctionnement et le relie à un bus commun avec l'adaptation nécessaire.

II.3.2.1. Modélisation d'un hacheur survolteur (Boost) [44] [42]

Les convertisseurs statiques DC/DC, également appelés hacheurs, sont souvent utilisés dans les systèmes photovoltaïques comme interface d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et sa charge. Ils permettent de commander le flux d'énergie générée par les GPV et de poursuivre le point de puissance maximale en suivant des stratégies de contrôle spécifiques.

Un convertisseur élévateur Boost est un amplificateur de tension, de sorte que la tension de sortie est donc toujours supérieure à la tension d'entrée. La figure (II.12) représente la structure d'un hacheur Boost utilisé pour l'adaptation des systèmes photovoltaïques.

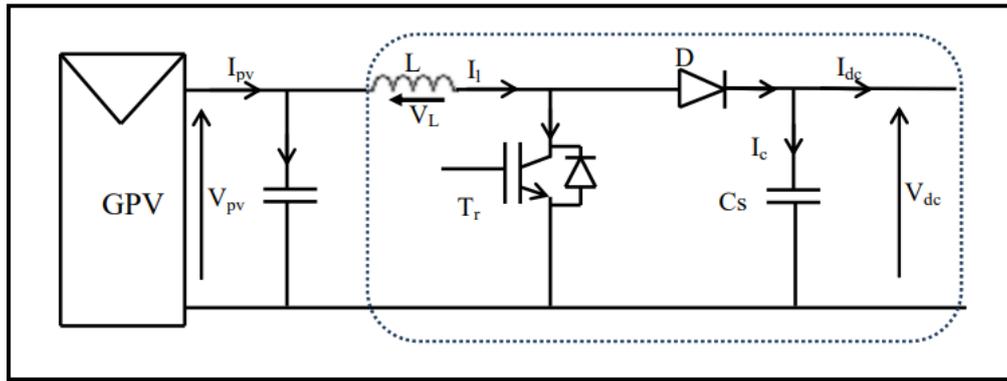


Figure II.12 : Circuit électrique du convertisseur DC-DC (Boost).

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T , comporte deux étapes. Lors de la première, on rend l'interrupteur passant (T_r est passant) et la diode, polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de 0 à αT (α rapport cyclique, et compris entre 0 et 1). La tension aux bornes de l'inductance vaut « $V_L = V_{pv}$ » et le courant traversant l'inductance augmente linéairement.

Lors de la seconde, on bloque l'interrupteur. La diode devient passante. Cette phase dure de « αT à T ». La tension aux bornes de l'inductance vaut « $V_L = V_{pv} - V_{dc}$ ». Dans cette phase le condensateur C_s est chargé en même temps par le courant stocké dans l'inductance et par le générateur. Les équations électriques d'un hacheur Boost sont comme suit :

$$V_{pv} = L \frac{dI_l}{dt} + (1 - \alpha)V_{dc} \quad (\text{II. 10})$$

$$(1 - \alpha)I_l = C_s \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{II. 11})$$

En valeur moyenne, la tension de sortie est en fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique moyen. Son expression est donnée par l'équation (II. 12) :

$$V_{dc} = \frac{1}{(1 - \alpha)} V_{pv} \quad (\text{II. 12})$$

Et le courant par la relation :

$$I_{dc} = (1 - \alpha)I_l \quad (\text{II. 13})$$

Avec :

$$\alpha = \frac{t_{ON}}{T} \quad (\text{II. 14})$$

α : est le rapport cyclique quand le comportement du circuit en conduction continue.

- La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique.

II.3.2.2. Modélisation de l'hacheur Buck-Boost [44]

Le convertisseur Buck-Boost est un inverseur de tension à stockage inductif, la tension de sortie est donc toujours de signe contraire à la tension d'entrée. Lorsque le transistor est fermé, le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée. Quand le commutateur est ouvert, la tension à travers l'inductance s'inverse et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode.

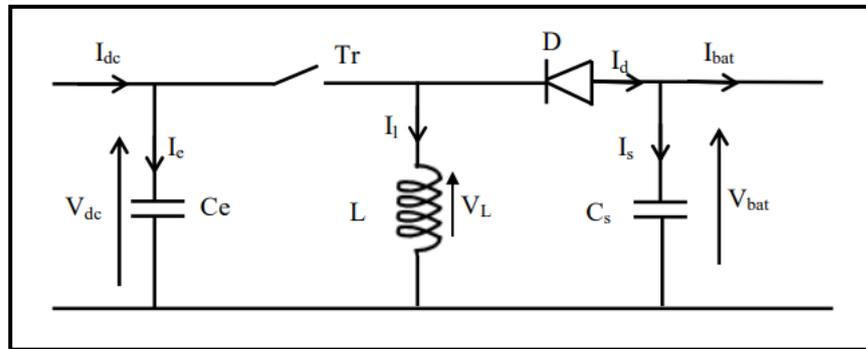


Figure II.13 : Circuit électrique du convertisseur DC-DC (Buck-Boost).

Le modèle approximé du convertisseur Buck-Boost, est représentée par les équations suivante [45] :

$$\begin{cases} C_1 \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} = \alpha \cdot (I_e - I_L) + (1 - \alpha) \cdot I_e \\ C_2 \cdot \frac{dV_{bat}}{dt} = -\alpha \cdot I_{bat} + (1 - \alpha) \cdot (I_L - I_{bat}) \\ L \cdot \frac{dI_L}{dt} = \alpha \cdot V_{dc} + (1 - \alpha) \cdot V_{bat} \end{cases} \quad (\text{II. 15})$$

La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, par conséquent l'équation de la tension aux bornes de la batterie décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée par :

$$V_{batt} = - \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} \cdot V_{dc} \quad (\text{II. 16})$$

Si nous admettons que la puissance échangée entre la batterie et le bus se conserve, alors nous pouvons écrire :

$$I_{batt} = -\frac{(1-\alpha)}{\alpha} \cdot I_{dc} \quad (\text{II. 17})$$

Avec :

α : le rapport cyclique.

II.3.2.3. Modélisation de l'onduleur [44]

Un onduleur de tension absorbe en entrée une tension continue et la convertit en une tension alternative à la sortie. En général, la tension d'entrée continue est constante et peut être obtenue à partir d'une ligne du secteur ou d'une machine tournante alternative après redressement et filtrage. Elle peut également être obtenue à partir de batteries ou de modules photovoltaïques. L'amplitude et la fréquence de la tension alternative de sortie peuvent être constantes ou variables selon l'application. Les applications typiques incluent la commande des moteurs, les alimentations sans interruption, l'alimentation électrique depuis des batteries ou des panneaux photovoltaïques et les filtres actifs.

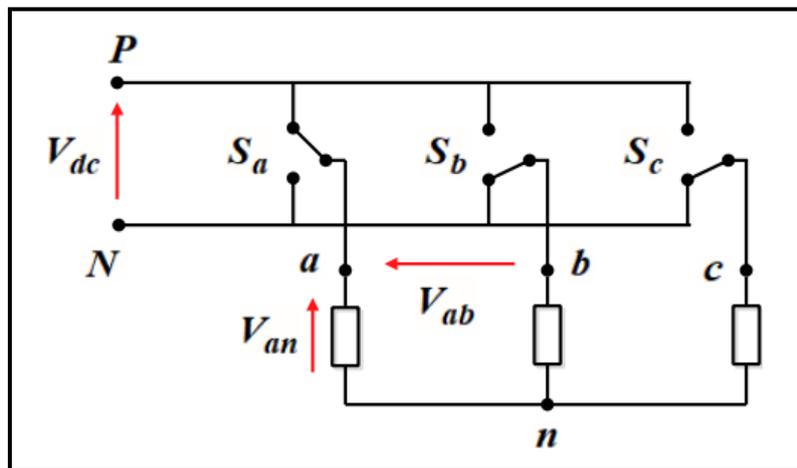


Figure II.14 : Modèle simplifié de l'onduleur de tension [44].

La matrice de connexion de l'onduleur est donnée par l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{cha} \\ V_{chb} \\ V_{chc} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 18})$$

$$I_{dc} = S_a I_{cha} + S_b I_{cb} + S_c I_{cc} \quad (\text{II. 19})$$

Avec :

I_{dc} : Courant modulé par l'onduleur.

S_a, S_b, S_c : Booléens correspondant aux états des interrupteurs.

V_{dc} : Tension continue à l'entrée de l'onduleur.

II.3.3. Modélisation du bus continu [44].

Le bus continu est constitué d'une capacité destinée à lisser la tension. La génération de la tension du bus continu résulte de l'intégration du courant capacitif.

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} \cdot I_c \quad (\text{II. 20})$$

Avec :

I_c : Courant qui traverse le condensateur.

II.3. Le modèle de simulation CIEMAT [46] :

Le modèle CIEMAT, développé par un centre de recherche espagnol appelé « Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas », est considéré comme un modèle complet. Il prend en compte la température et est souvent désigné comme un modèle "universel". Contrairement à d'autres modèles couramment utilisés, il n'exige pas d'identification expérimentale ou de paramètres empiriques.

Le choix d'un modèle mathématique permettant de simplifier le comportement de la batterie dépend du type de problèmes à étudier. Ce modèle peut être utilisé pour analyser les différents flux d'énergie se produisant à l'intérieur et à l'extérieur de la batterie de manière simple. C'est pour cela que nous avons choisi le modèle « CIEMAT » d'une capacité de **150 Ah**.

Capacité nominal (Ah)	150
Tension (V)	12
Résistance interne (mΩ)	7
Durée (ans)	6

Tableau II.2 : Paramètres électriques de la batterie.

Voici l'équation (II. 21), qui représente le modèle mathématique décrivant de manière optimale les phénomènes physiques de charge et de décharge de la batterie :

$$U_{batt} = N_b E_b \pm N_b R_i I_{batt} \quad (\text{II. 21})$$

Avec :

V_{batt} : Tension de la batterie.

N_b : Nombre de cellule constituant la batterie.

E_b : La force électromotrice, qui est en fonction de l'état de charge de la batterie (EDC).

R_i : La résistance interne d'une cellule de la batterie, dépend de l'état de charge.

I_{batt} : Courant de la batterie.

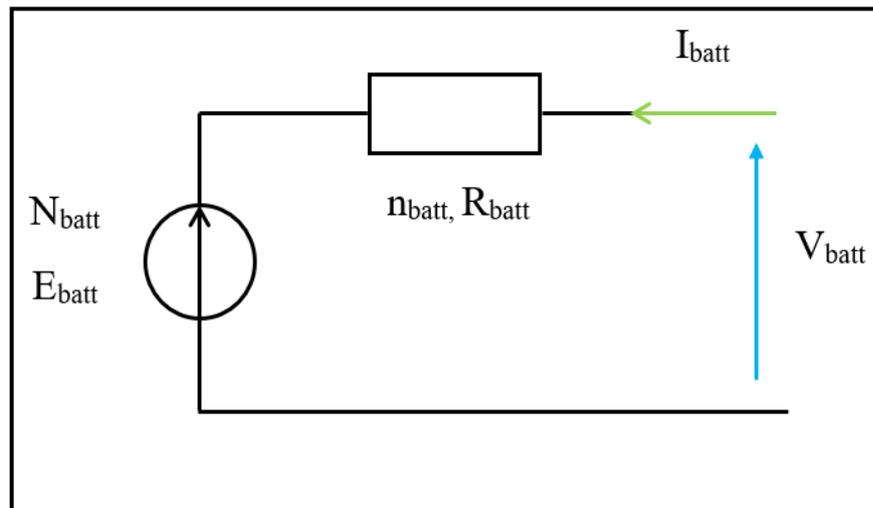


Figure II.15 : Circuite équivalent de modèle CIEMAT.

II.3.4.1 Équation de formulation CIEMAT :

II.3.4.1.1. La capacité [47] :

Afin d'identifier les phénomènes physiques qui influencent le fonctionnement du système de stockage, en particulier sa capacité, il est nécessaire de prendre en considération la température. Le modèle de capacité, qui quantifie la quantité d'énergie pouvant être restituée en fonction du courant moyen de décharge (I_{moy}), est exprimé par l'équation suivante :

$$C_{batt} = C_{10} \times \frac{1.67}{1 + 0.67 [I_{moy}/I_{10}]^{0.9}} \times (1 + 0.005 \times \Delta T) \quad (II. 22)$$

Avec :

C_{batt} : La capacité de la batterie.

C_{10} : la capacité de la batterie déchargée en 10 heures.

I_{10} : Le courant de décharge en 10 heures.

ΔT : L'échauffement de la batterie.

II.3.4.1.2. L'état de charge

La capacité C_{batt} est utilisée comme point de référence pour évaluer l'état de charge (EDC) de la batterie. Ce dernier est déterminé en fonction de la quantité de charge manquante à la batterie, représentée par Q_d .

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{batt}} \quad (II. 23)$$

La variation de Q_d au fil du temps est influencée par le mode de fonctionnement de la batterie. Q_d se calcule par la fonction suivante :

$$Q_d = I_{batt} \times t \quad (II. 24)$$

Avec :

t : la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant I_{batt} .

Q_d : la quantité de charge manquante à la batterie.

En complément de l'état de charge, on détermine également l'état de décharge de la batterie (aussi appelé profondeur de décharge) par la formule suivante :

$$EDD = 1 - EDC \quad (II. 25)$$

II.3.4.1.3. Tension de charge

L'équation de tension lors de la charge, avant l'apparition du phénomène de gassing, présente une structure similaire à celle obtenue lors de la décharge. Elle met en évidence l'influence à la fois de la force électromotrice et de la résistance interne.

Lorsque la tension aux bornes de la batterie V_{batt} atteint la tension de V_g , également appelée tension de gassing, on observe une augmentation abrupte de la tension, ce qui indique la présence du phénomène de gassing. Ce phénomène est associé à la libération d'hydrogène et d'oxygène. Toutefois, dans ce contexte, la tension de gassing n'est pas prise en compte [45].

$$V_{batt-ch} = \eta_b \cdot [2 + 0.6 \cdot EDC] - \eta_b \cdot \frac{|I_{batt}|}{C_{10}} \cdot \left(\frac{6}{1 + |I_{batt}|^{0.86}} + \frac{0.48}{1 - EDC^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025 \cdot \Delta T) \quad (II. 26)$$

Avec :

$V_{batt-ch}$: La Tension de charge de la batterie.

η_b : Le rendement de la batterie.

II.3.4.1.4. Tension de décharge [47]

La tension de décharge de la batterie, est principalement liés aux éléments interne de la batterie : la force électromotrice, la résistance interne et l'influence des paramètres.

$$V_{\text{batt-dch}} = \eta_b \cdot [1.965 + 0.12 \cdot \text{EDC}] - \eta_b \cdot \frac{|I_{\text{batt}}|}{C_{10}} \cdot \left(\frac{4}{1 + |I_{\text{batt}}|^{1.3}} + \frac{0.27}{\text{EDC}^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007 \cdot \Delta T) \quad (\text{II. 27})$$

Avec :

$V_{\text{batt-dch}}$: La tension de décharge de la batterie.

II.3.4.1.5. Resistance de la batterie [47]

La résistance interne d'une batterie n'est pas une valeur fixe, mais elle fluctue en fonction de l'état de charge, de la température et du vieillissement. En général, la résistance interne d'une batterie augmente lorsque l'état de charge augmente. De même, pour une charge donnée, la résistance interne d'une batterie augmente avec le temps en raison du vieillissement de la batterie.

Tout comme il y a une tension de charge et une tension de décharge, il existe également une résistance en charge et une résistance en décharge :

II.3.4.1.6. Resistance en charge [30] :

La résistance en charge est représentée par la formule suivante :

$$R_{\text{dch}} = \frac{1}{C_{10}} \times \left(\frac{6}{1 + |I_{\text{batt}}|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - \text{EDC})^{1.2}} + 0.036 \right) \times (1 - 0.025 \times \Delta T) \quad (\text{II. 28})$$

II.3.4.1.7. Resistance en décharge [30] :

La résistance en décharge est représentée par la formule suivante :

$$R_{\text{ch}} = \frac{1}{C_{10}} \times \left(\frac{4}{1 + |I_{\text{batt}}|^{1.3}} + \frac{0.27}{\text{EDC}^{1.5}} + 0.02 \right) \times (1 - 0.007 \times \Delta T) \quad (\text{II. 29})$$

II.3.4.1.8. Rendement de charge et décharge [47]

Le rendement coulombien lors de la décharge est généralement considéré comme étant de 100% ($n_{cb-dch} = 1$). En revanche, le rendement coulombien lors de la charge dépend fortement du taux de charge. Il atteint approximativement 100% pour de faibles courants de charge et un faible niveau de charge, mais diminue à mesure que nous approchons de la pleine charge.

$$n_{cb-dch} = 1 - \exp\left(\frac{20.73}{\frac{I_{batt}}{I_{10}} + 0.55}\right) \times (EDC - 1) \quad (II.30)$$

- Par la modélisation et la simulation de modèle « CIEMAT » de $C_{batt} = 150$ Ah sur MATLAB SIMULINK, sous un courant $I_{batt} = 7.5$ A et une température $T = 25^\circ\text{C}$, nous avons obtenu les caractéristiques de capacité- courant $C_{batt}(I_{batt})$, tension de charge-courant $V_{ch-batt}(I_{batt})$ et tension de décharge-courant $V_{dech-batt}(I_{batt})$, représentées sur les figures (II.17), (II.18) et (II.19) :

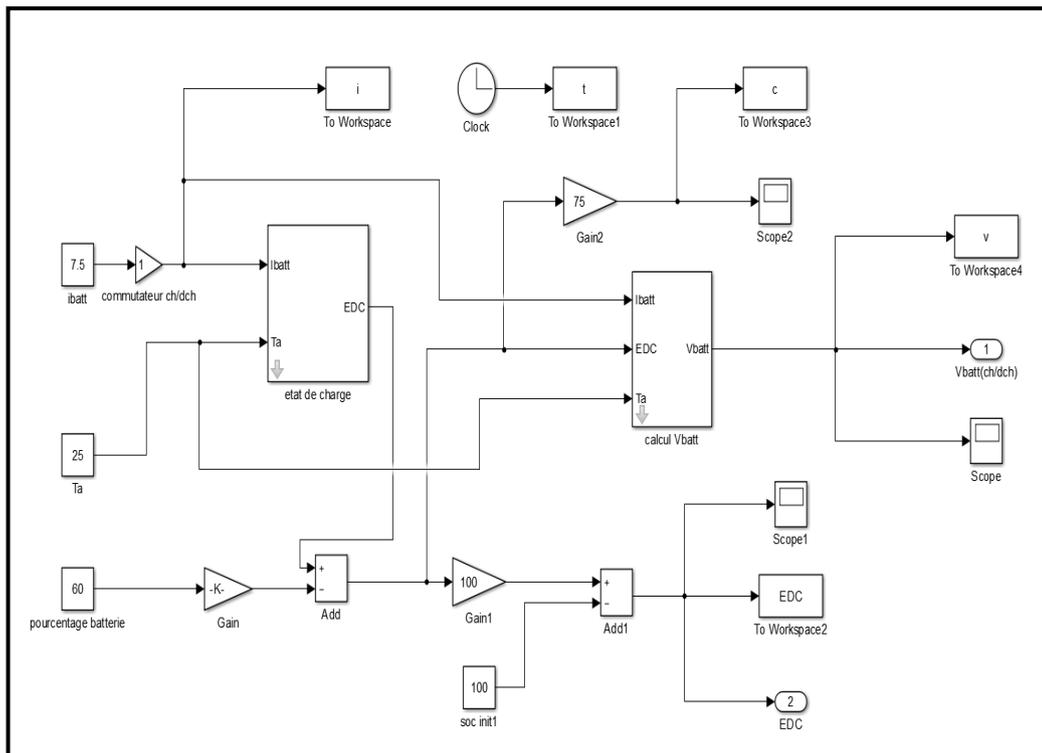


Figure II.16 : Schéma bloc du modèle CIEMAT réalisé avec MATLAB SIMULINK.

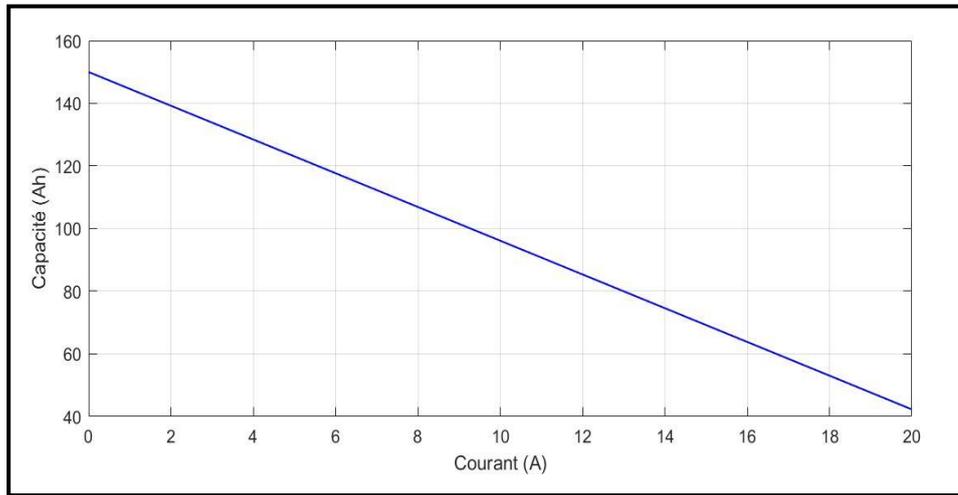


Figure II.17 : Caractéristique $C_{\text{batt}} = f(I_{\text{batt}})$ pour une durée de 20h, ($I_{\text{batt}} = 7.5\text{A}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$).

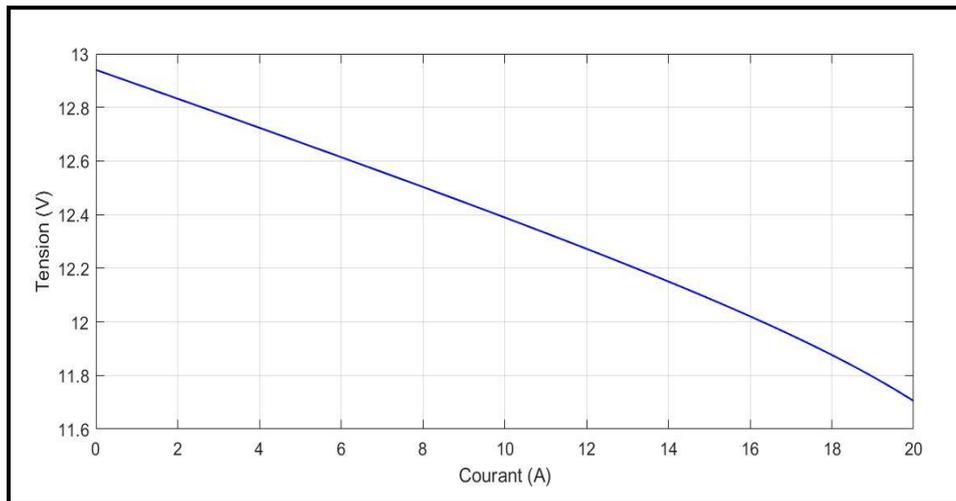


Figure II.18 : Caractéristique $V_{\text{dech-batt}} = f(I_{\text{batt}})$, tension de décharge-courant pour une durée de 20h (initialement chargé à 100%, $I_{\text{batt}} = 7.5\text{A}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$).

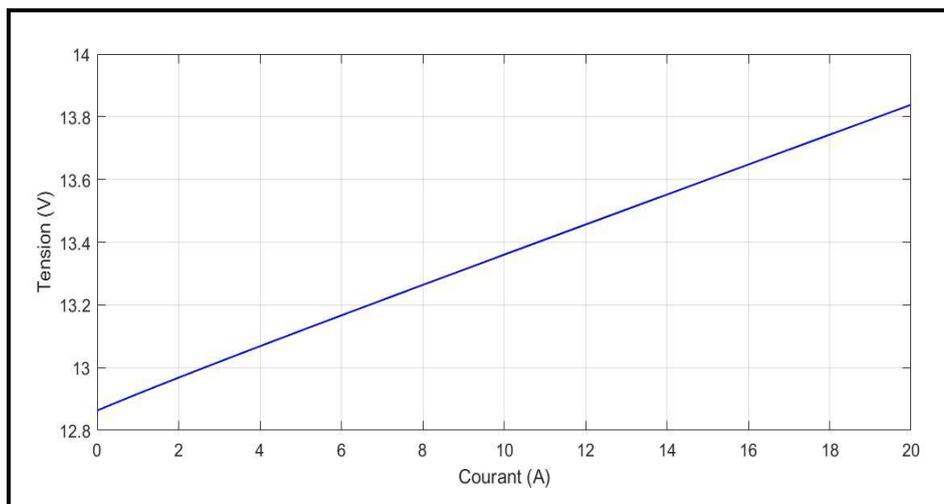


Figure II.19 : Caractéristique $V_{\text{ch-batt}} = f(I_{\text{batt}})$, tension de charge-courant pour une durée de 20h (initialement chargé à 40%, $I_{\text{batt}} = 7.5\text{A}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$).

II.3.4.2. Influence de la température sur les caractéristiques de la batterie

Pour déterminer les trois caractéristiques : capacité-courant $C_{\text{batt}}(I_{\text{batt}})$, tension de charge-courant $V_{\text{ch-batt}}(I_{\text{batt}})$ et tension de décharge-courant $V_{\text{dech-batt}}(I_{\text{batt}})$, nous avons effectué une simulation pour notre modèle de la batterie, pour différents niveaux de températures ($T_a = 5^\circ\text{C}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$, $T_a = 45^\circ\text{C}$ et $T_a = 55^\circ\text{C}$).

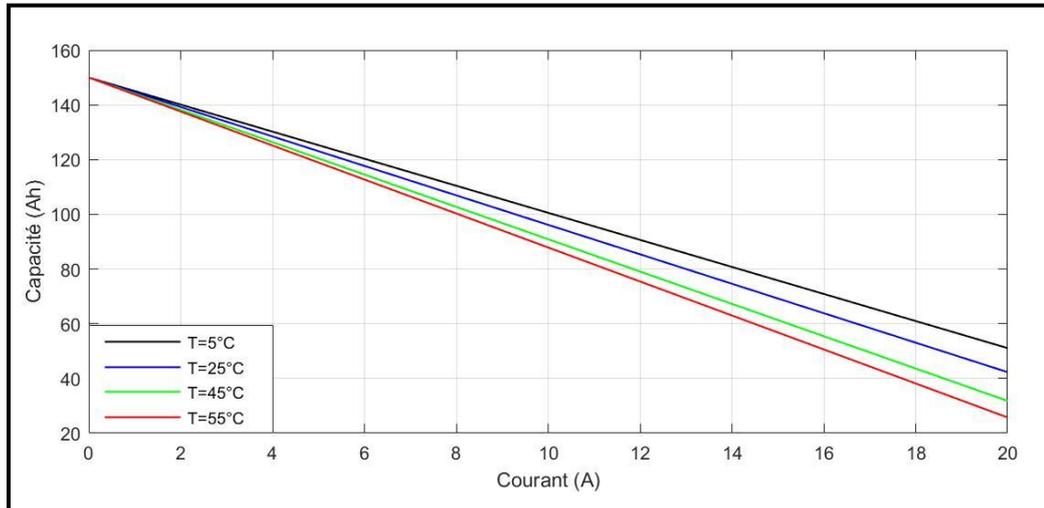


Figure II.20 : Influence de la température sur la caractéristique $C_{\text{batt}} = f(I_{\text{batt}})$.

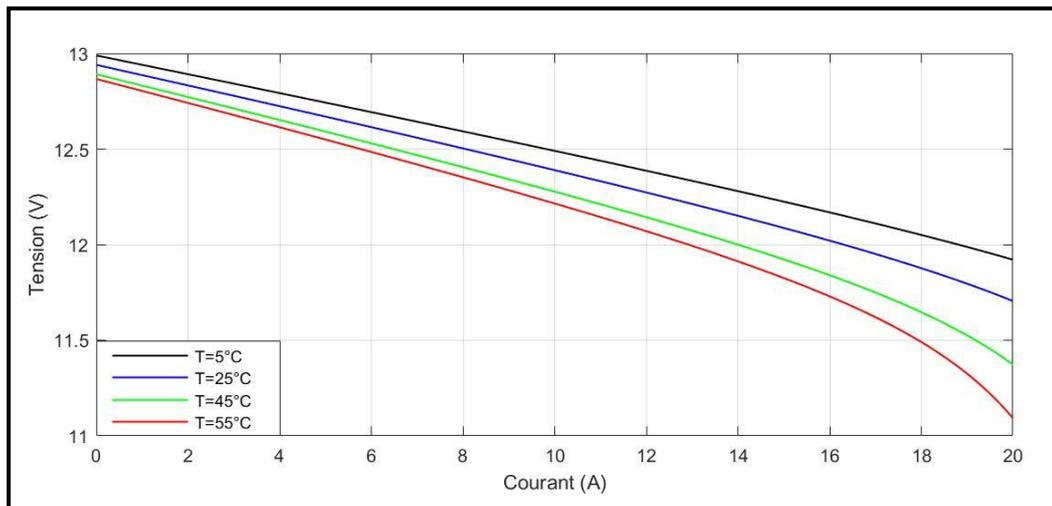


Figure II.21: Influence de la température sur la caractéristique $V_{\text{dech-batt}} = f(I_{\text{batt}})$.

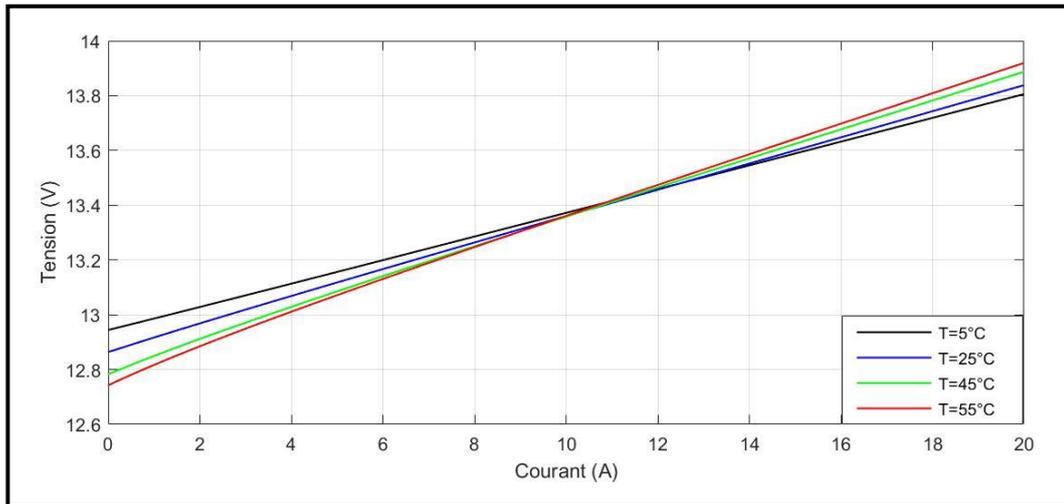


Figure II.22 : Influence de la température sur la caractéristique $V_{\text{ch-batt}} = f(I_{\text{batt}})$.

➤ Discussion des résultats de l'influence de la température sur la batterie

Nous avons obtenu les courbes illustrées dans les figures (II.20), (II.21) et (II.22) en utilisant différentes valeurs de température (T_a), avec un courant constant de $I_{\text{batt}} = 7.5 \text{ A}$ pour une durée de 20 heures.

On observe que :

1. Lorsqu'on augmente la température, on remarque une diminution significative de la capacité et de la tension de décharge de la batterie pour une durée identique. La relation inverse entre l'augmentation de la température et les deux caractéristiques est indiquée par ces observations.
2. La tension de charge présente une relation proportionnelle avec l'augmentation de la température. En effet, lorsque la température de la batterie augmente, cela entraîne également une augmentation de la tension de charge de la batterie.

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentée la modélisation des composants principale d'un système photovoltaïque autonome munie d'un système de stockage, ainsi que l'influence des paramètres météorologique sur les performances et le rendement de notre générateur photovoltaïque connectée sans l'application de la commande MPPT.

Afin d'assurer une exploitation optimale de la conversion photovoltaïque, il est essentiel de réaliser une étude approfondie des conditions météorologiques du lieu où notre système sera installé.

Chapitre III :
Optimisation du générateur photovoltaïque

III.1. Introduction

L'optimisation est une action d'obtenir le meilleur, d'améliorer un fonctionnement, un rendement, une utilisation.

L'optimisation des systèmes photovoltaïques vise à augmenter la production d'énergie solaire, d'optimiser le rendement global du système, de réduire les pertes d'énergie, de maximiser le retour sur investissement et parer aux contraintes engendrées par différents changements climatiques.

Nous aurons la capacité d'optimiser les systèmes photovoltaïques par : le Dimensionnement et la configuration, la gestion de l'ombre, l'entretien et le nettoyage et aussi par la surveillance et le suivi, mais optimisé efficacement nécessite principalement le contrôleur de poursuite de point de puissance maximale (MPPT : Maximum Power Point Tracking), qui s'applique pour l'optimisation de générateur PV. Les performances de ce contrôleur dépendent de la rapidité d'atteindre le point de puissance maximale (MPP), de la façon d'osciller autour de ce point et de la robustesse de ce contrôleur [45]. En effet, l'optimisation du système photovoltaïque signifie l'optimisation du générateur photovoltaïque.

III.2. Optimisation du générateur photovoltaïque [49]

Un générateur photovoltaïque peut opérer à différentes tensions et courants de sortie, cependant, il ne produit sa puissance maximale qu'à des valeurs spécifiques de courant et de tension. La caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ du générateur dépend de l'éclairement et de la température, et en raison de leur nature intermittente, les générateurs photovoltaïques subissent des variations de la valeur du point de puissance maximale. Un convertisseur statique commandé et alors intercalé entre le générateur et le récepteur, permettant ainsi de rattraper à chaque instant le point de puissance maximale. Ces commandes sont appelées MPPT (Maximum Power Point Tracking) définissent précédemment comme contrôleurs, et assurent le couplage entre le générateur photovoltaïque et le récepteur, forçant le premier à délivrer sa puissance maximale

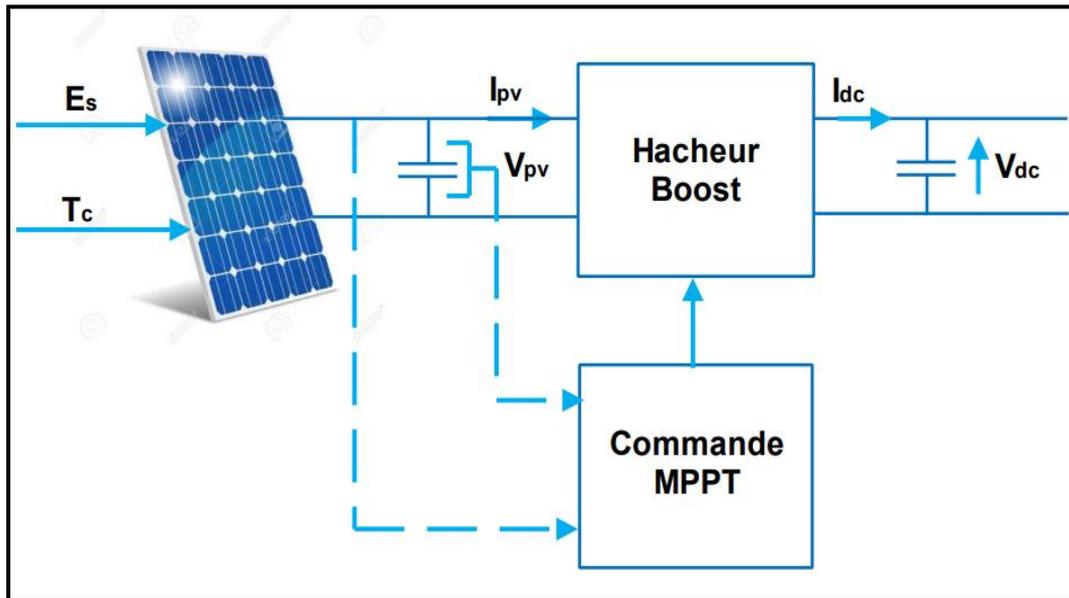


Figure III.1 : Insertion de contrôleur MPPT dans la chaîne de conversion PV.

III.2.1. Adaptation de l'énergie photovoltaïque [48]

Un module photovoltaïque génère de la puissance avec différentes combinaisons de courant et de tension. Cependant, il existe des valeurs optimales de tension et de courant, appelées tension et courant optimaux, qui permettent d'atteindre le point de puissance maximale (PPM) pour des conditions spécifiques d'éclairement et de température. Lorsqu'il n'y a pas d'intervention, le module ne fonctionne pas à sa tension optimale. Pour remédier à cela, un convertisseur DC/DC, appelé extracteur du point de puissance maximale, est utilisé pour ajuster la tension entre la source photovoltaïque et la charge.

III.2.2. La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking)

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), combinée à un convertisseur DC/DC d'adaptation, permet d'exploiter au maximum la puissance d'un générateur photovoltaïque, indépendamment des conditions météorologiques telles que l'irradiation solaire et la température. Cette commande positionne de manière optimale le système au point de fonctionnement maximum (courant optimal I_{PV-opt} et tension optimale V_{PV-opt}) en continu [48] [49].

Les avancées techniques considérables dans la conception des commandes ont conduit à l'émergence de plusieurs méthodes de commande de régulateur de charge MPPT (Maximum Power Point Tracking) afin d'optimiser les performances et d'extraire la puissance maximale d'un système photovoltaïque (PV). Ces méthodes peuvent être classées en deux catégories principales, comme indiqué dans le tableau ci-dessous [49] :

Méthodes indirectes	Méthode de la tension à circuit ouvert
	Méthode de courant de court-circuit
	Méthode d'ajustement de courbe
	Méthode « look-up table »
Méthodes directes	Méthode Perturbation et Observation (P&O)
	Méthode de conductance incrémentielle (CI)
	Les techniques d'intelligence artificielle : <ul style="list-style-type: none"> ❖ Réseaux de neurones ❖ Logique floue : <ol style="list-style-type: none"> 1. Ensembles flous 2. Fuzzification et fonctions d'appartenances 3. Défuzzification : <ul style="list-style-type: none"> • Méthode de maximum • Méthode de la moyenne des maximums • Méthode du centre de gravité

Tableau III.1 : Différentes méthodes de la commande MPPT [49].

- Les méthodes indirectes tirent parti de bases de données contenant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques dans différentes conditions climatiques telles que la température et l'ensoleillement. Elles utilisent également des équations mathématiques empiriques pour estimer le point de puissance maximale. Ces méthodes sont souvent spécifiques à chaque type de panneau, rendant leur généralisation difficile. En revanche, les méthodes directes sont basées sur les mesures de tension et de courant des panneaux, et leur algorithme est conçu pour exploiter la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas de connaissances préalables sur les caractéristiques spécifiques des panneaux photovoltaïques [49].

Nous avons désigné deux méthodes à étudier qui sont comme suit :

- ❖ Méthode de la Perturbation et Observation (P&O).
- ❖ Méthode de la conductance incrémentielle (CI).

III.2.2.1. Méthode de Perturbation et Observation (P&O)

Cette méthode est couramment utilisée en raison de sa simplicité et de sa capacité de trouver un équilibre entre des objectifs contradictoires (maximiser la production d'énergie, minimiser les coûts d'investissement et réduire l'impact environnemental), car elle nécessite une boucle de rétroaction et peu de mesures. Elle consiste à délibérément perturber la tension aux bornes des panneaux solaires (l'augmenter ou la diminuer), puis à comparer la puissance obtenue avant et après la perturbation. Plus précisément, si la puissance aux bornes des panneaux augmente en raison de la perturbation, la prochaine perturbation est réalisée dans la même direction. En revanche, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est effectuée dans le sens opposé (par un pas d'incrément).

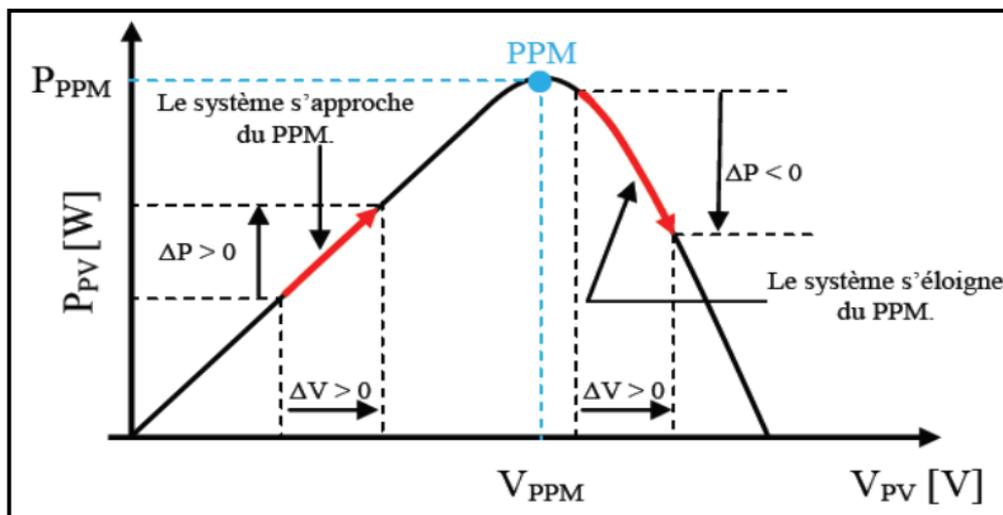


Figure III.2 : Caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$ d'un panneau photovoltaïque.

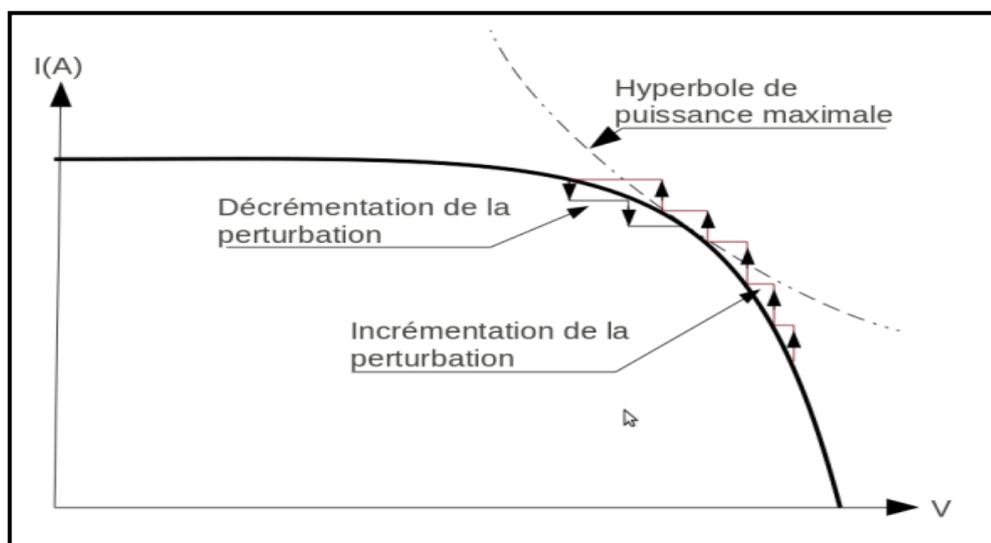


Figure III.3 : Représentation du trajet de différentes incréments sur la caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$ [50].

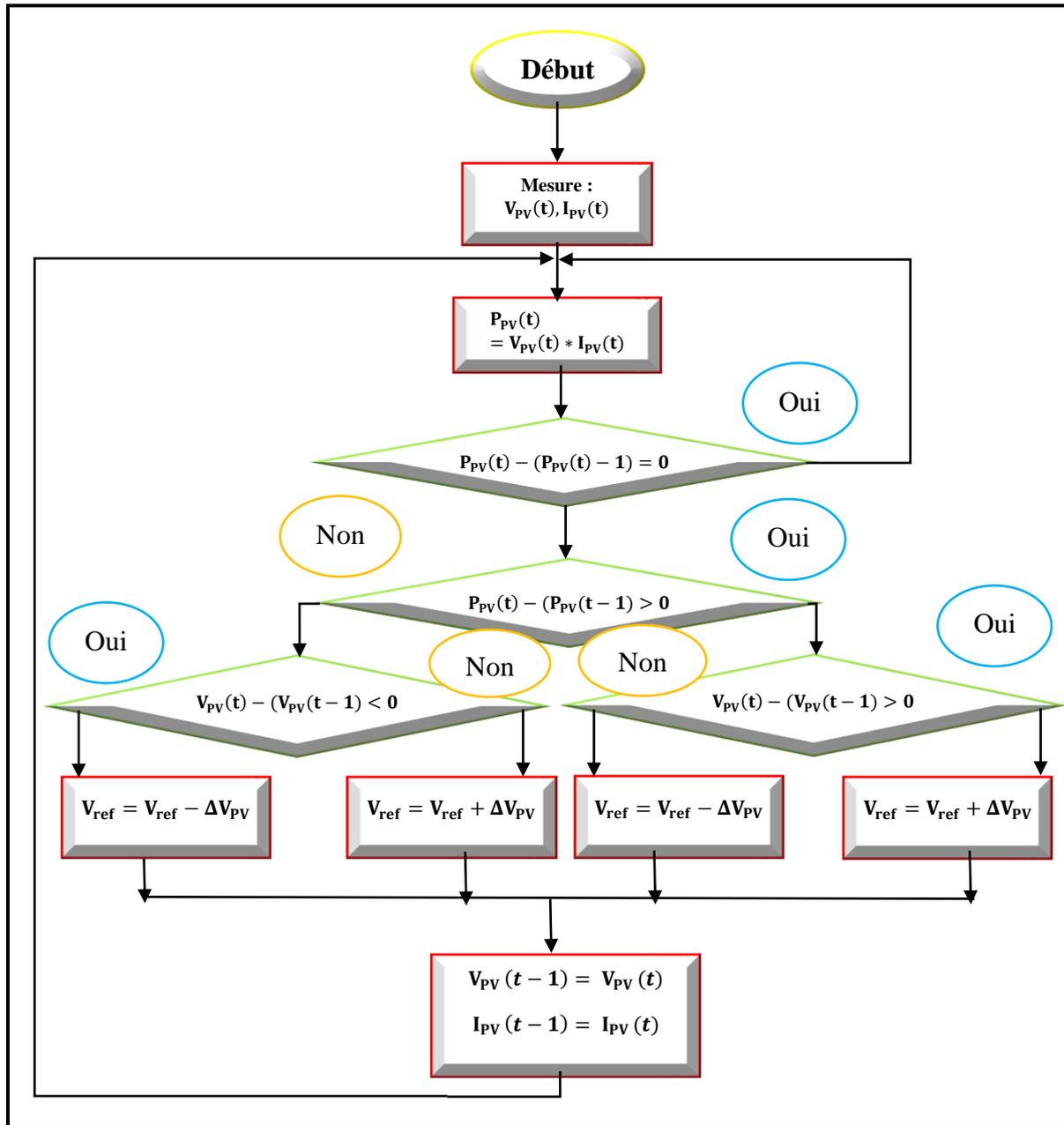


Figure III.4 : Diagramme fonctionnel de la méthode de Perturbation & d’Observation « P&O ».

- Les figures (III.5) et (III.6), montrent les résultats de simulation de l’application de l’algorithme de la « P&O » sur notre GPV ($P_{PV}(V_{PV})$ et $I_{PV}(V_{PV})$), pour un panneau de 300 W, dans les conditions STC ($E_s=1000W/m^2$ et $T=25^\circ C$) :

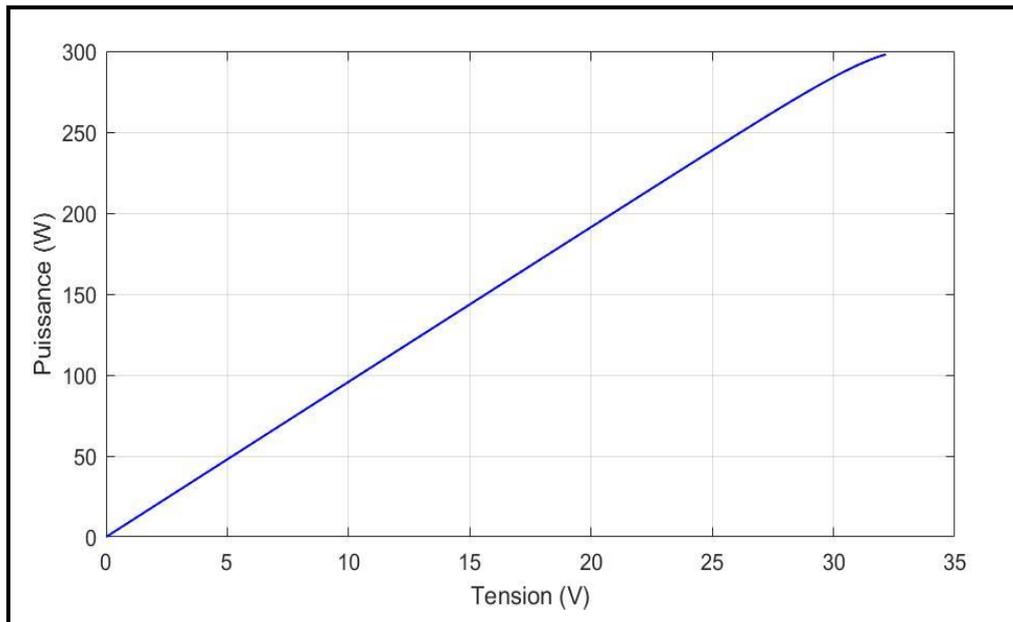


Figure III.5 : Caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$ avec l'algorithme P&O.

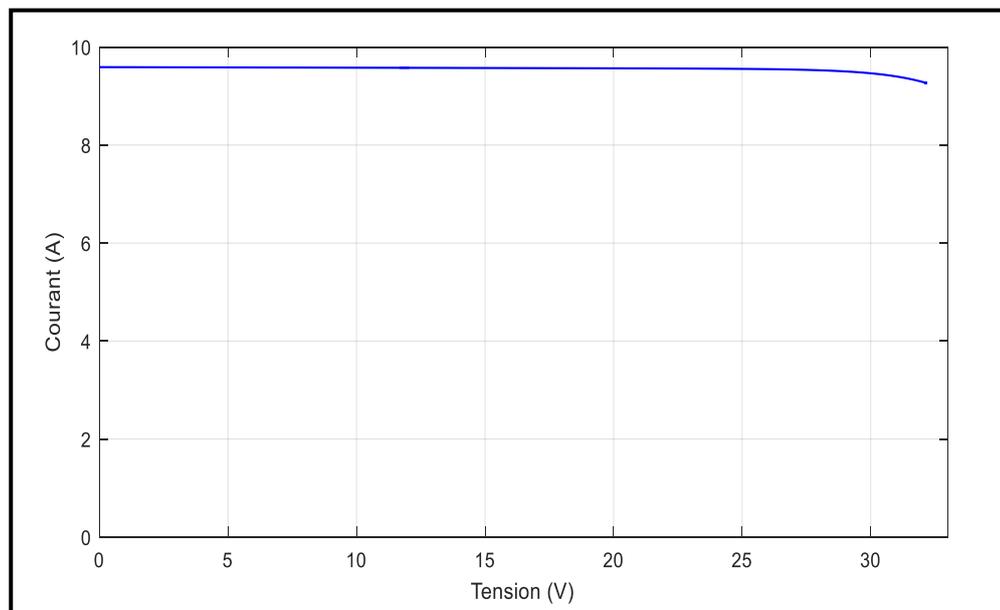


Figure III.6 : Caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$ avec l'algorithme P&O.

II.2.2.1.1. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV

Les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque, sont obtenue avec l'application d'un algorithme d'optimisation (MPPT) « P&O : Perturbation et observation », pour différente variation d'ensoleillement et de température.

II.2.2.1.1.1. Influence de la température

Sous une valeur de l'ensoleillement fixe ($E_s=1000\text{W/m}^2$), et à différentes valeurs de la température, nous allons tracer les deux caractéristiques $P_{PV}(V_{PV})$ et $I_{PV}(V_{PV})$, afin d'observer l'influence de la température sur notre GPV :

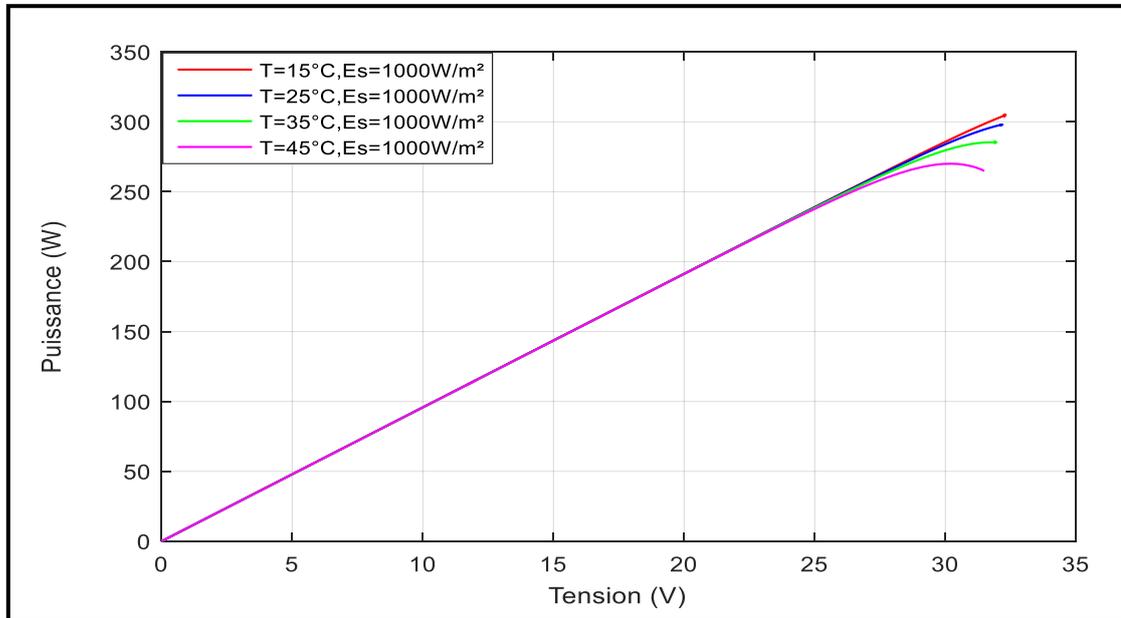


Figure III.7 : Caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$ avec l'algorithme P&O, en variant la température pour $E_s=1000\text{ W/m}^2$.

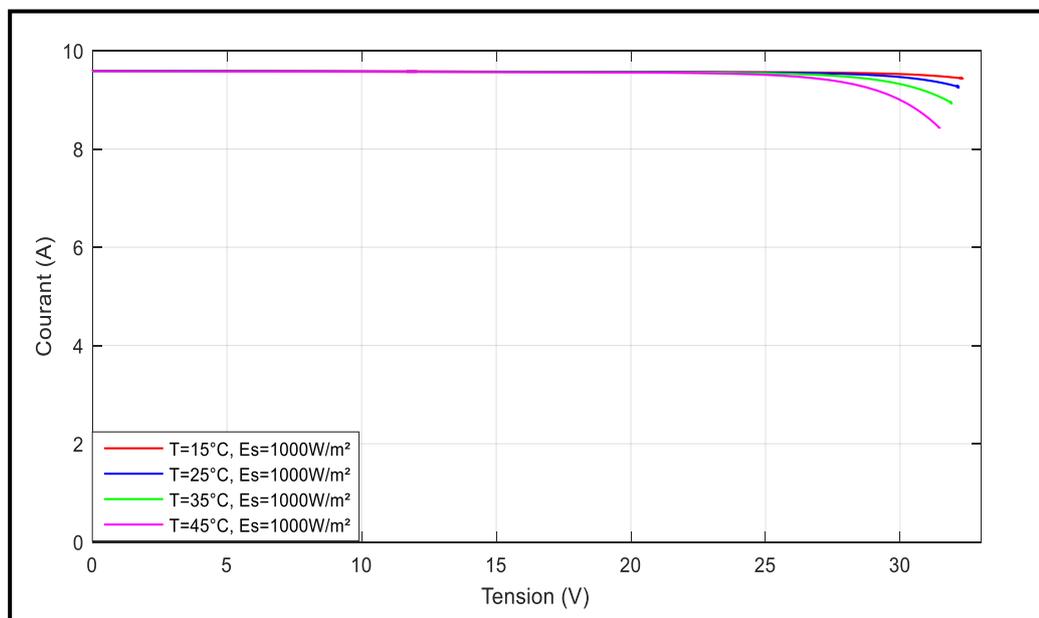


Figure III.8 : Caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$ avec l'algorithme P&O, en variant la température pour $E_s=1000\text{ W/m}^2$.

III.2.2.1.1.2. Influence de l'ensoleillement

Sous une température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$), et à différentes valeurs de l'ensoleillement, nous allons tracer les deux caractéristiques $P_{PV}(V_{PV})$ et $I_{PV}(V_{PV})$, afin d'observer l'influence de l'ensoleillement sur notre GPV :

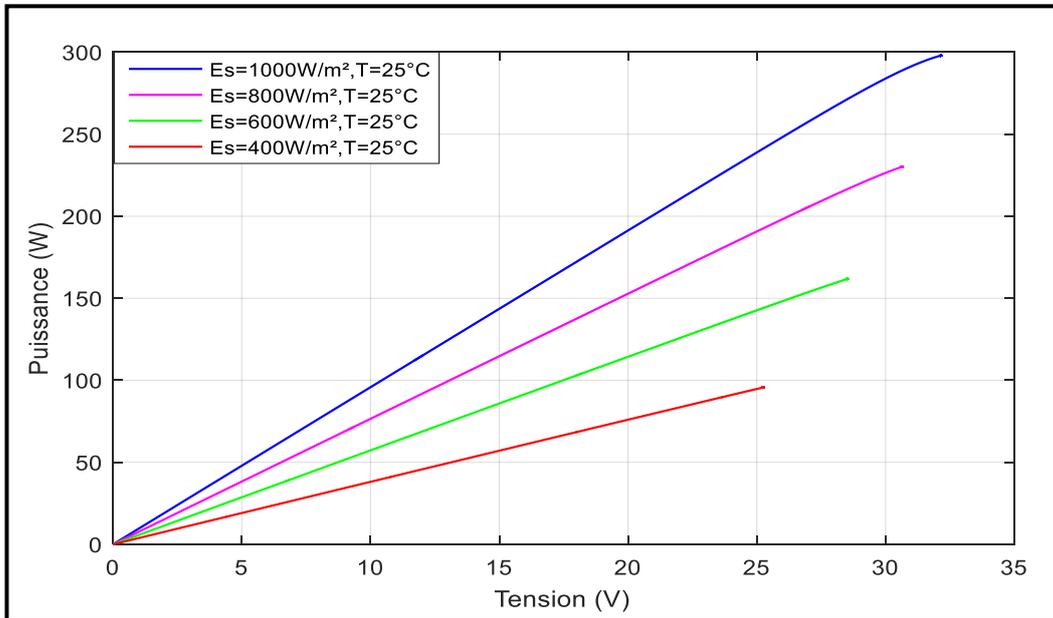


Figure III.9 : Caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$ avec l'algorithme P&O, en variant l'ensoleillement pour une température $T=25^{\circ}\text{C}$.

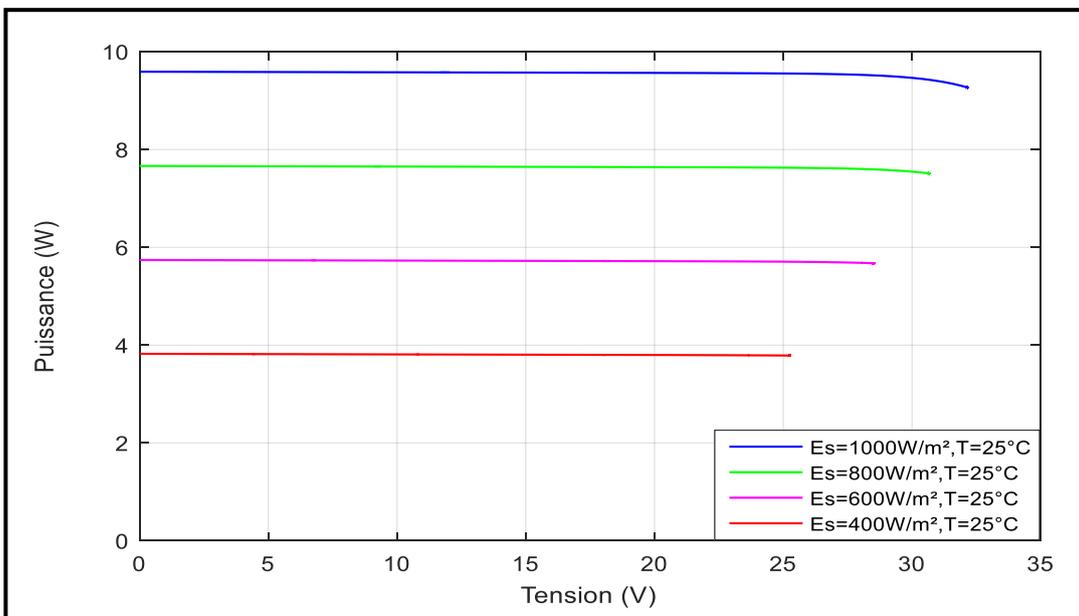


Figure III.10 : Caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$ avec l'algorithme P&O, en variant l'ensoleillement pour une température $T=25^{\circ}\text{C}$.

III.2.2.2. Méthode de la conductance incrémentielle (CI) [49] [42]

L'algorithme de l'incrémentation de conductance (IC) est une technique MPPT classique qui utilise deux sondes pour la mesure de la tension V de fonctionnement et du courant I du module PV [51]. Cette méthode s'intéresse directement aux variations de la puissance en fonction de la tension. La conductance est une grandeur physique couramment connue qui est définie comme le rapport entre l'intensité et la tension ($G = \frac{I_{PV}}{V_{PV}}$). D'autre part, la conductance incrémentielle se réfère au rapport entre la variation de l'intensité et la variation de la tension entre deux moments donnés ($\Delta G = \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}}$). Lorsqu'on compare la conductance G à la conductance incrémentielle ΔG , il est nécessaire de trouver le maximum de la courbe (figure II.11) en identifiant le point où la dérivée de la puissance s'annule.

Pour définir la méthode de la CI par un ensemble d'équations, nous commençons par la loi fondamentale de la puissance à la sortie de la source :

$$P_{PV} = I_{PV} \cdot V_{PV} \quad (\text{III. 1})$$

La dérivée de l'équation (II.29) par rapport à la tension nous donne :

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(VI)_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} \cdot \frac{dV_{PV}}{dV_{PV}} + V_{PV} \cdot \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (\text{III. 2})$$

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \cdot \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (\text{III. 3})$$

$$\frac{1}{V_{PV}} \cdot \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{I_{PV}}{V_{PV}} + \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (\text{III. 4})$$

$$\frac{1}{V_{PV}} \cdot \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = G + \Delta G \quad (\text{III. 5})$$

Selon l'algorithme IC représenté sur la figure (II.32), la fonction centrale utilise les conditions suivantes afin d'atteindre le MPP :

$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} > 0 \Rightarrow G > \Delta G$	$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} < 0 \Rightarrow G > \Delta G$	$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \Rightarrow G > \Delta G$
--	--	--

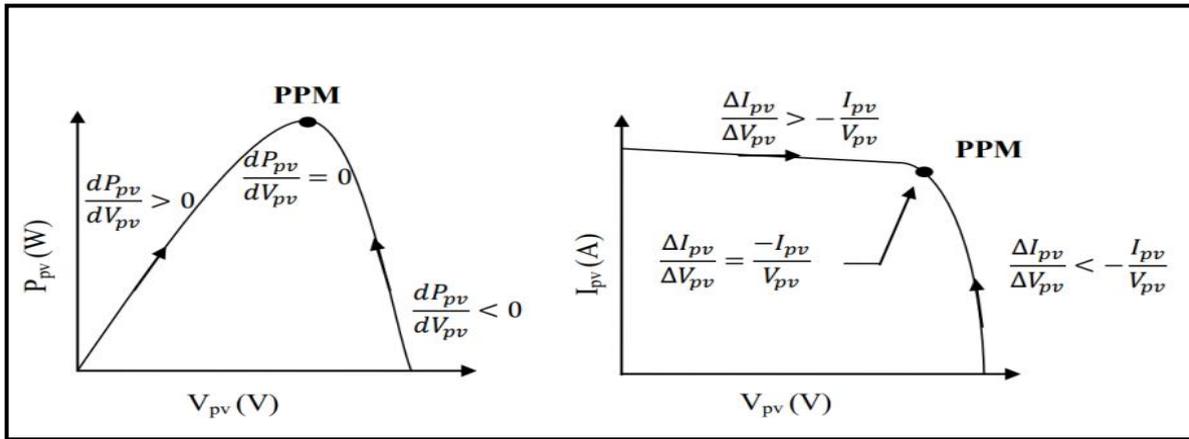


Figure III.11 : Principe de la commande « Incrément de conductance ».

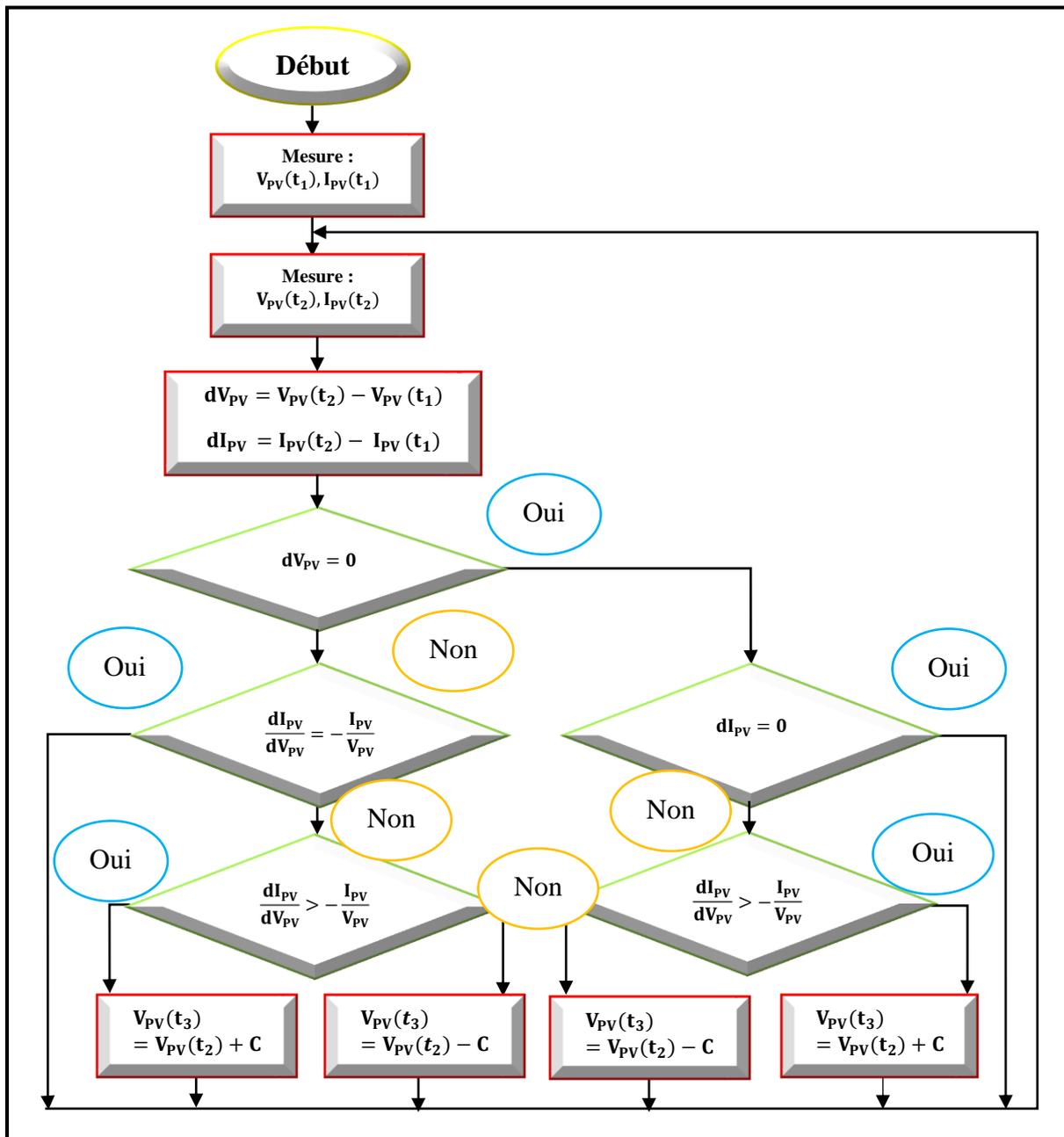


Figure III.12 : Organigramme de l'algorithme de la conductance incrémentielle « CI ».

- La figure (III.13) et (III.14), montrent les résultats de simulation ($P_{PV}(V_{PV})$ et $I_{PV}(V_{PV})$) par l'application de l'algorithme de la conductance incrémentielle « CI » sur un panneau de 300 W, dans les conditions STC ($E_s=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$) :

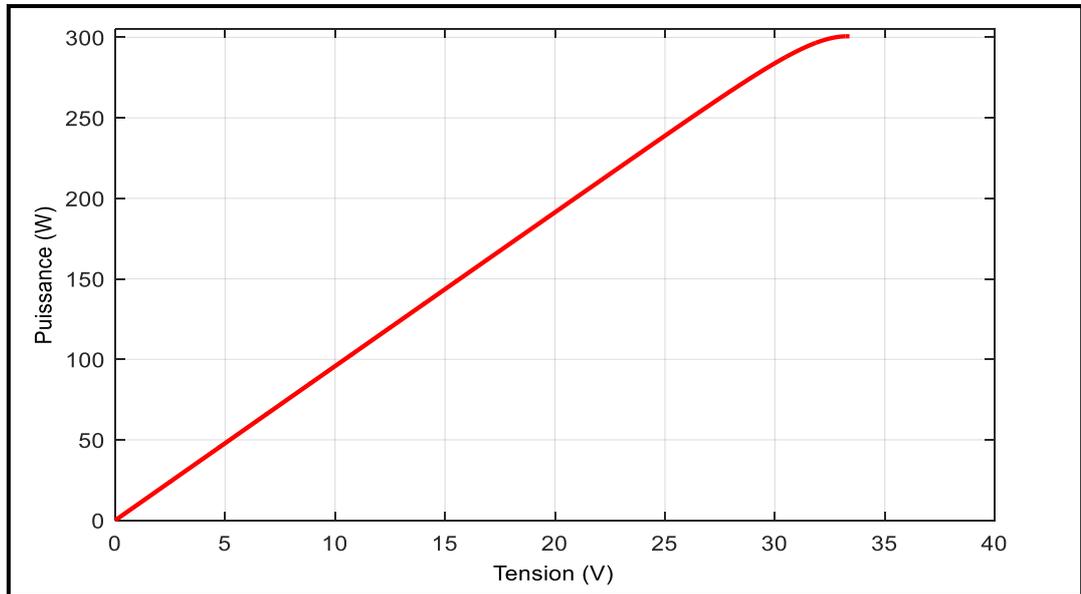


Figure III.13 : Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ avec l'algorithme de la CI.

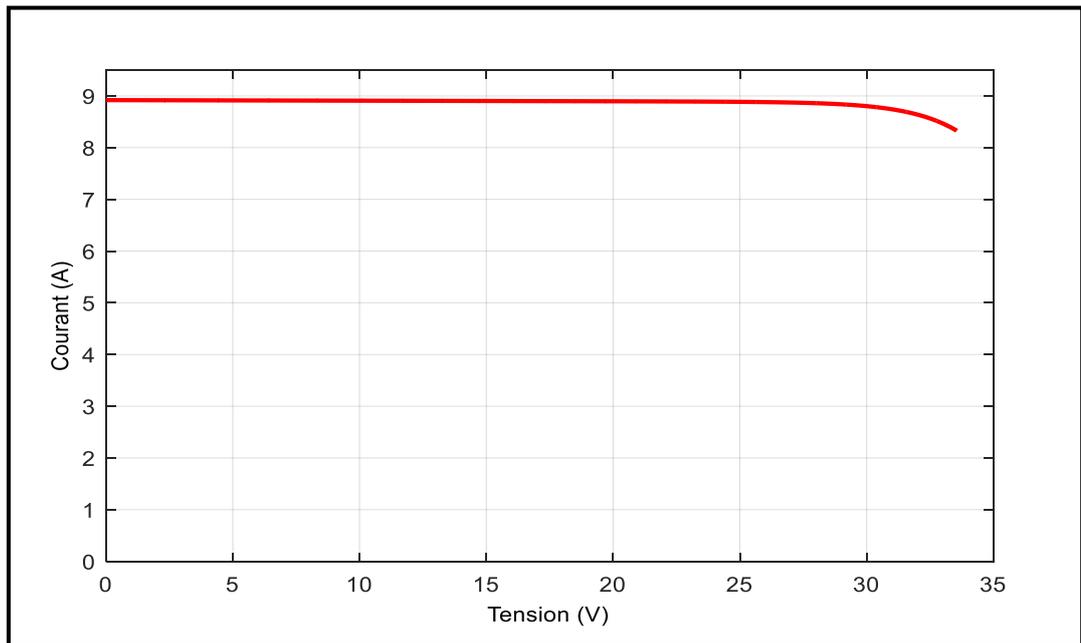


Figure III.14 : Caractéristique $I_{PV}(V_{PV})$ avec l'algorithme de la CI.

III.2.2.2.1. Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du module PV

Les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque, sont obtenus avec l'application d'un algorithme d'optimisation (MPPT) « CI : Conductance incrémentielle », pour différentes variations d'ensoleillement et de température.

II.2.2.2.1.1. Influence de la température

Pour une valeur d'ensoleillement constante ($E_s=1000\text{W/m}^2$), et à différentes valeurs de température, nous allons tracer les caractéristiques $P_{PV}(V_{PV})$ et $I_{PV}(V_{PV})$, afin d'observer l'influence de la température sur notre GPV :

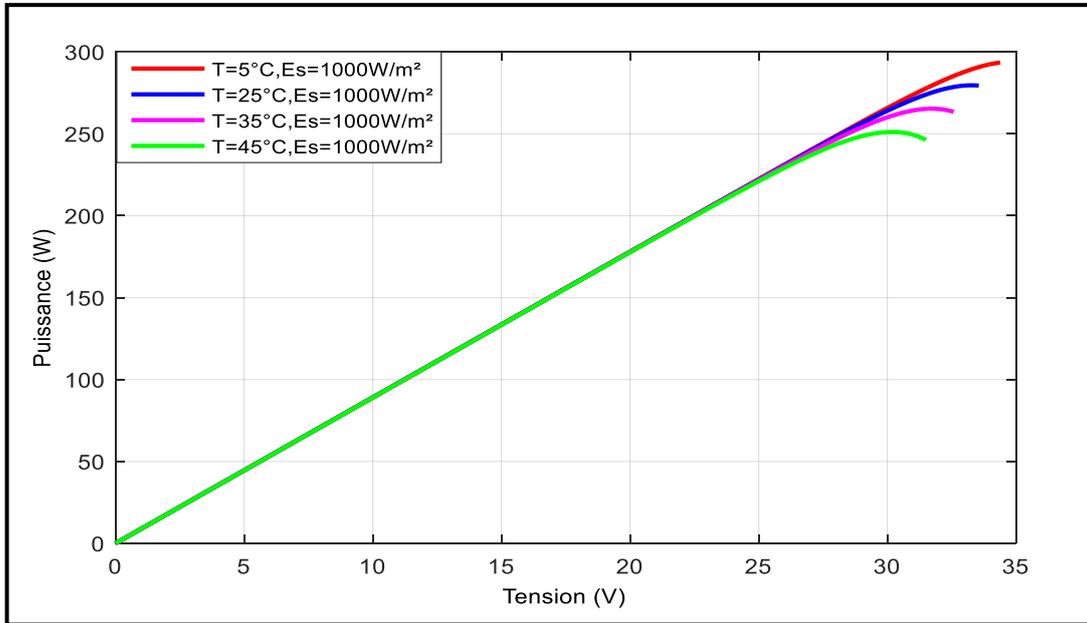


Figure III.15 : Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ avec l'algorithme de la CI, en variant la température pour $E_s=1000\text{ W/m}^2$.

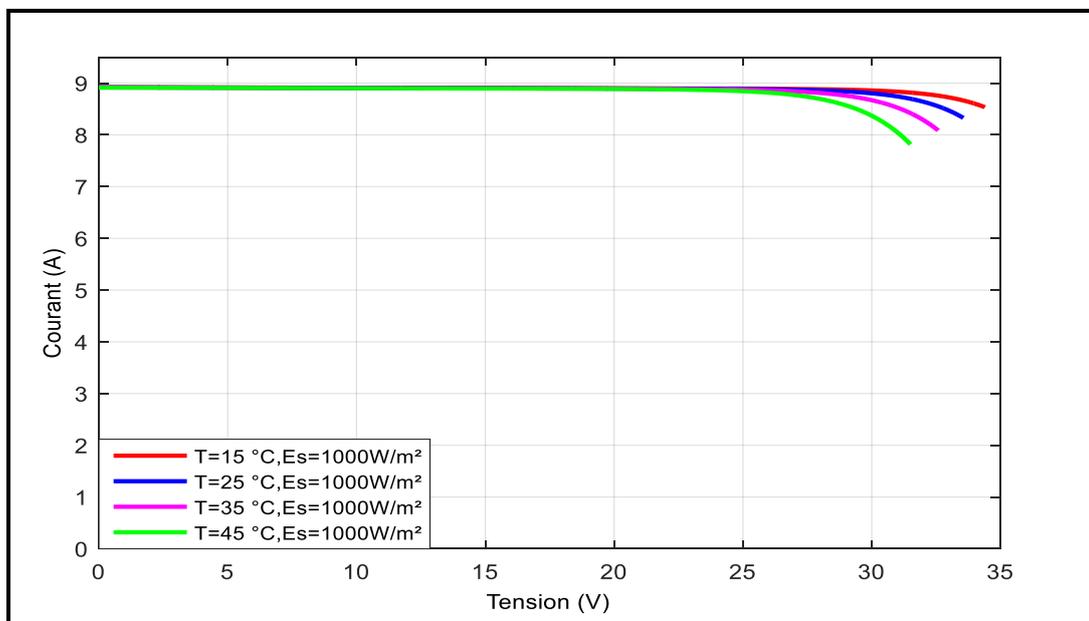


Figure III.16 : Caractéristique $I_{PV}(V_{PV})$ avec l'algorithme de la CI, en variant la température pour $E_s=1000\text{ W/m}^2$.

II.2.2.2.1.2. Influence de l'ensoleillement

Pour une température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$), et à différentes valeurs d'ensoleillement, nous allons tracer les caractéristiques $P_{PV}(V_{PV})$ et $I_{PV}(V_{PV})$, afin d'observer l'influence de la température sur notre GPV :

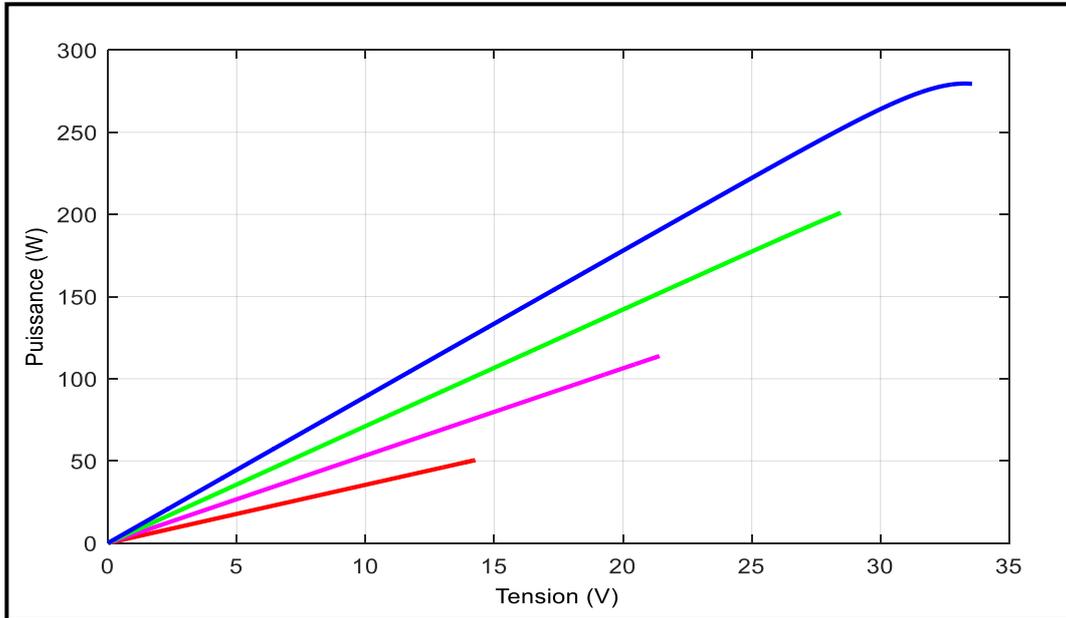


Figure III.17 : Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ avec l'algorithme de la CI, en variant l'ensoleillement, pour $T=25^{\circ}\text{C}$.

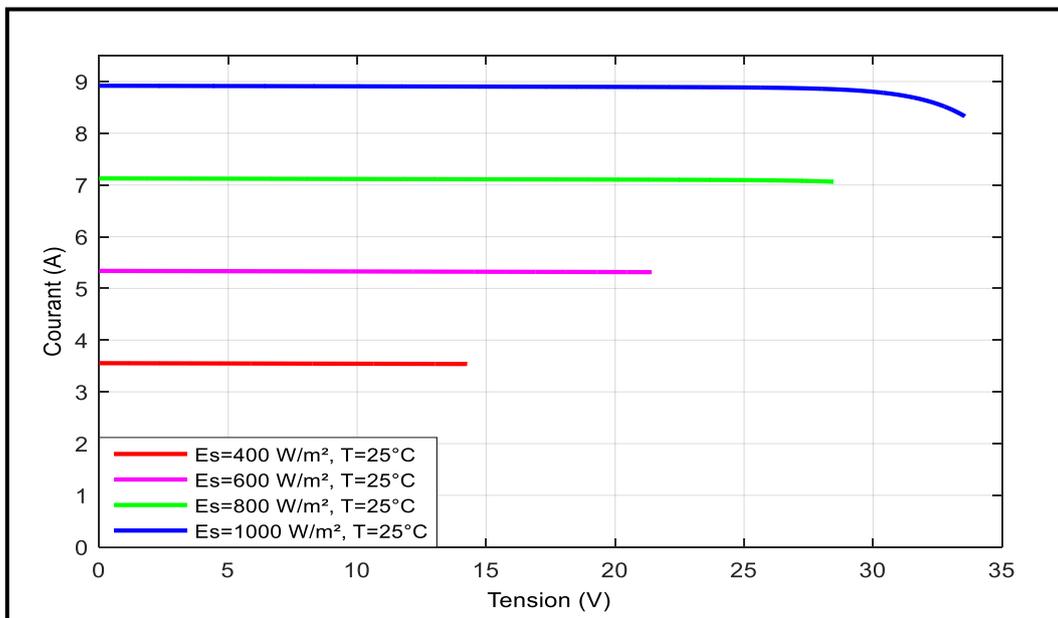


Figure III.18 : Caractéristique $I_{PV}(V_{PV})$ avec l'algorithme de la CI, en variant l'ensoleillement, pour $T=25^{\circ}\text{C}$.

- ❖ La présence de l'influence de la température et l'ensoleillement sur les caractéristiques principales d'un générateur photovoltaïque Puissance-tension ($P_{PV}(V_{PV})$)

et Courant-tension ($I_{PV}(V_{PV})$), est toujours indiqué, avec ou sans l'application de la commande conventionnelle MPPT (P&O ou CI).

✚ La méthode de la conductance incrémentielle est avantageuse dans les environnements où la luminosité est faible ou lorsque les conditions météorologiques changent rapidement. Elle permet la maximisation de la production d'énergie solaire avec une manière plus précise et plus rapide pour l'atteinte de PPM, tout en réduisant les pertes et en prolongeant la durée de vie des équipements de notre système PV. Cependant, la mise en œuvre efficace de la méthode de la conductance incrémentielle nécessite une formation spécialisée en raison de sa complexité technique, malgré sa popularité persistante, en revanche, la méthode de Perturbation et Observation (P&O) présente quelques inconvénients liés aux oscillations qui se produisent une fois que le point de puissance maximale (PPM) est atteint comme la figure (III.19) le montre. En effet, cette méthode nécessite une recherche périodique du PPM, ce qui entraîne des oscillations constantes autour de ce point optimal. Pour atténuer ces oscillations, il est possible de réduire la magnitude de la perturbation appliquée. Cependant, une valeur de perturbation trop faible prolonge le temps nécessaire pour atteindre le PPM. Ainsi, il est important de trouver un compromis entre la précision de la méthode et la vitesse de recherche du PPM.

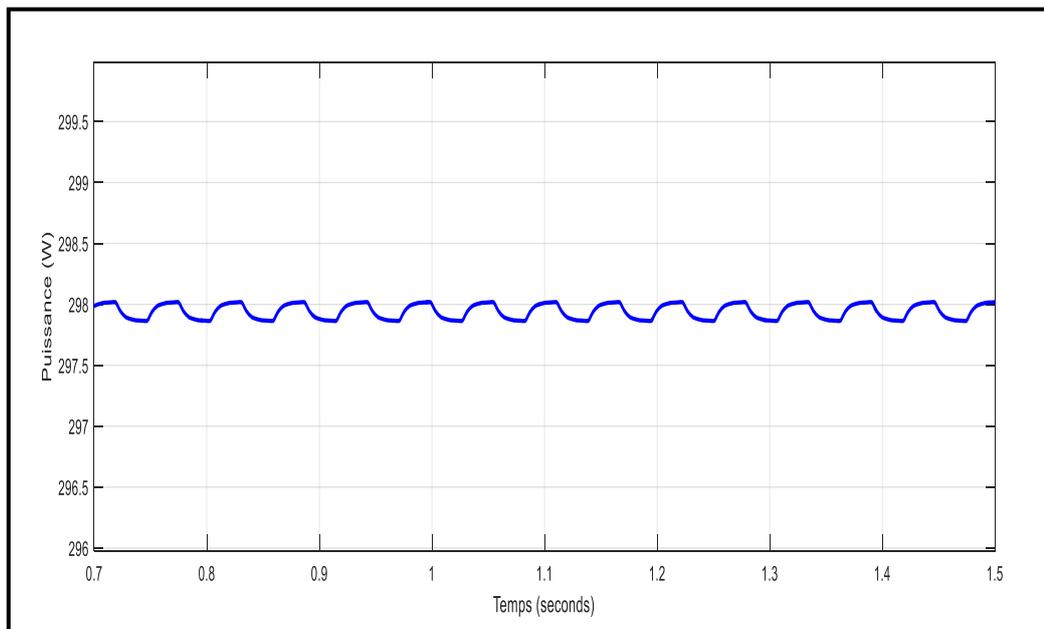


Figure III.19 : Zoom sur la caractéristique $P_{pv}(t)$ de GPV par l'application de l'algorithme de la P&O.

III.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentée l'optimisation d'un générateur photovoltaïque, avec l'application de deux méthodes de commande MPPT (P&O et CI), avec et sans l'influence des conditions météorologiques sur les performances de notre système PV.

L'optimisation des systèmes PV est un élément essentiel pour améliorer l'efficacité et la rentabilité de l'énergie photovoltaïque. En utilisant des modèles précis et en optimisant les paramètres du système, plus particulièrement le générateur photovoltaïque, il est possible de maximiser la production d'énergie PV et de contribuer ainsi à la transition vers des sources d'énergie plus durables et renouvelables.

Chapitre IV :

Dimensionnement du système photovoltaïque étudié

IV.1. Introduction

Pour la réalisation de chaque installation photovoltaïque, une étape initiale est toujours nécessaire dite « le dimensionnement ». Elle sert à déterminer : le besoin journalier du consommateur, le nombre des panneaux PV à installer pour assurer une production suffisante, le système de stockage (nombre et type de batteries) qui assure le bon fonctionnement du système en cas d'absence d'ensoleillement ou pendant la nuit, l'onduleur le plus adéquat pour l'installation, le cout de l'installation photovoltaïque.

IV.2. Le but de dimensionnement

La phase de dimensionnement revêt une importance capitale lors de la conception des systèmes photovoltaïques. Il s'agit de choisir de manière adéquate les différents composants tels que les panneaux solaires, les batteries, l'onduleur, le régulateur et les câbles, en fonction d'une ressource solaire donnée et d'un profil de consommation spécifique. Ce processus permet d'obtenir un dimensionnement optimal pour assurer une performance optimale du système et une utilisation efficace de l'énergie solaire disponible [52]. Le dimensionnement ayant une incidence sur le prix, la qualité et la pérennité d'un système photovoltaïque en site isolé, il constitue une étape cruciale lors de la mise en place du système. Ainsi, lorsque l'on cherche à optimiser le dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome, le but est de déterminer l'ensemble des paramètres de dimensionnement du système afin de minimiser les différents coûts, tout en assurant l'alimentation sans interruption du consommateur [53].

Partie I : principe de dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome avec stockage

IV.3. Description du système photovoltaïque à dimensionner

C'est un système photovoltaïque autonome muni de batteries de stockage. Les systèmes fondés sur la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire isolés, présentent des besoins en matière de stockage afin de répondre à la problématique d'intermittence de leur production [54]. Une installation photovoltaïque autonome est un système d'alimentation électrique qui fonctionne indépendamment du réseau électrique public, c'est un type d'installation destinée aux sites isolée où il est difficile ou couteux d'acheminer l'électricité depuis le réseau électrique principale [55].

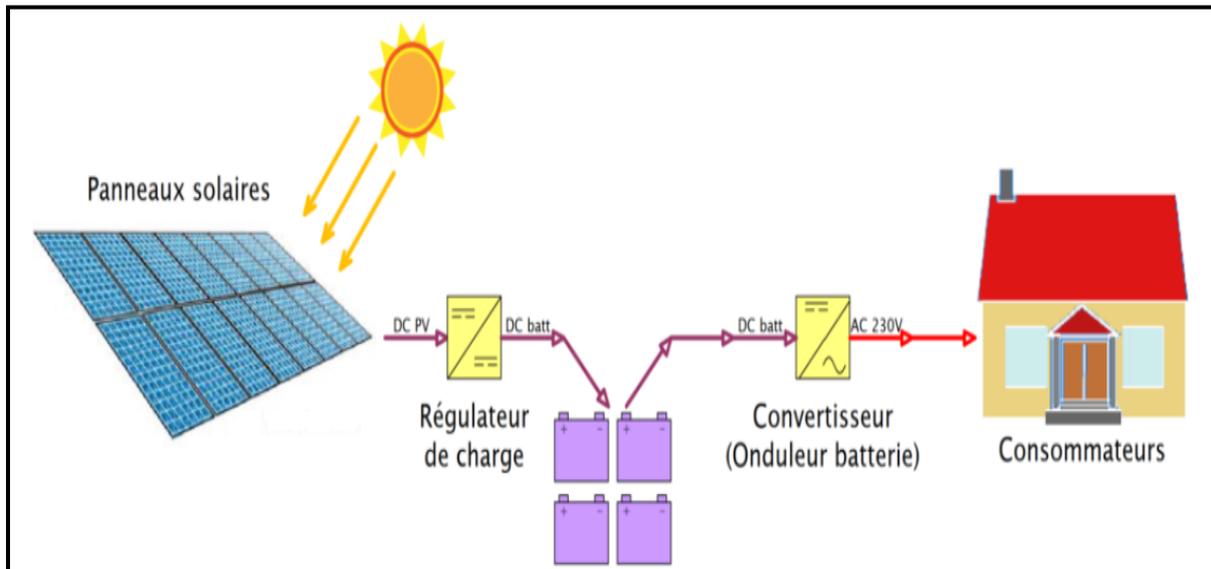


Figure IV.1 : l'architecture de base pour l'électrification d'un site isolé [56].

IV.4. Dimensionnement du système photovoltaïque [57]

La première étape du dimensionnement d'une installation PV autonome consiste à :

- Déterminer les données d'irradiations du lieu
- Estimer la consommation globale du consommateur en électricité.
- Déterminer le moment d'exploitation de l'électricité produite par les panneaux PV par le consommateur.

Effectuer un bon dimensionnement dépend aussi de la méthode choisie, pour chaque méthode ses spécificités.

IV.4.1. Choix des méthodes de dimensionnement [57]

Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement d'un système photovoltaïque, les méthodes les plus utilisées sont comme suite :

IV.4.1.1. La méthode du mois le plus défavorable [57]

L'irradiation joue un rôle crucial dans la conception des systèmes photovoltaïques. Cette approche consiste à estimer les besoins énergétiques pendant le mois le moins ensoleillé de l'année, appelé mois le plus défavorable. Ce mois correspond à celui où la valeur moyenne mensuelle de l'irradiation est la plus faible. Dans certains pays, cela correspond à la période hivernale. En Algérie, le mois choisi comme mois le plus défavorable est le mois de décembre.

Le choix de cette période est généralement basé sur le climat et l'utilisation prévue de l'installation. Il est important de déterminer le nombre maximum de jours d'autonomie

nécessaire pour que la batterie puisse alimenter le système pendant les jours sans ensoleillement. Si le bilan énergétique garantit le bon fonctionnement du système pendant cette période, on peut avoir l'assurance de son fonctionnement tout au long de l'année. Cette méthode est généralement utilisée pour les sites isolés ou éloignés, où des systèmes photovoltaïques autonomes sont nécessaires.

IV.4.1.2. La méthode de la moyenne annuelle

Elle est similaire à celle du mois le plus défavorable, mais elle utilise également l'irradiation quotidienne. Cependant, au lieu de se limiter à un seul mois, elle considère la moyenne de l'irradiation sur toute l'année. Par conséquent, on calcule la moyenne annuelle de l'énergie récupérable sur un site pour les 12 mois de l'année. Cette méthode est généralement appliquée pour tous les systèmes photovoltaïques mais plus particulièrement pour les systèmes hybrides (comme les systèmes raccordés aux réseaux) [57].

IV.4.1.3. Méthode de probabilité d'erreur sur la charge (L.L.P) [57]

Cette méthode effectue des bilans énergétiques quotidiens sur une longue période (plusieurs années). On utilise des modèles mathématiques pour évaluer les différentes charges et prendre en compte les probabilités d'erreurs lors de leur étude. Cela assure une grande fiabilité des modules et des batteries. Cette méthode est considérée comme l'une des plus fiables pour dimensionner les systèmes photovoltaïques. Cependant, elle présente une difficulté d'application en raison de sa complexité par rapport aux autres méthodes. En effet, elle fait souvent appel aux réseaux de neurones. Le modèle mathématique le plus couramment utilisé dans cette approche est appelé LLP, qui est défini par l'équation suivante :

$$\mathbf{LLP} = \frac{\int \mathbf{EDf}}{\int \mathbf{EDm}} \quad (\text{IV. 1})$$

EDf : énergie déficitaire.

EDm : énergie demandée

- Pour effectuer un dimensionnement juste et efficace nous avons choisi l'application de la méthode la plus simple : la méthode du mois le plus défavorable.

IV.4.2. Gisement solaire et coordonnées géographiques

Une bonne connaissance du gisement solaire est essentielle pour étudier les systèmes photovoltaïques, tout comme pour toutes les applications de l'énergie solaire. En raison de sa situation géographique, l'Algérie bénéficie d'un des gisements solaires les plus abondants au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures par an, et dans les hauts plateaux et le Sahara, elle peut même atteindre les 3900 heures. [58]

Un site géographique est défini par [59] :

- Son nom, pays et région (localisation) du monde.
- Ses coordonnées géographiques : Latitude, longitude, altitude et fuseau horaire.
- Données météorologiques mensuelles.

IV.4.3. Etape de dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome [60]

Le dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome se fait en suivant l'ordre des étapes suivantes :

1. Evaluation du besoin en électricité (B_j)
2. Evaluation de la puissance crête du champ photovoltaïque (P_c).
3. Dimensionnement des panneaux.
4. Dimensionnement des batteries.
5. Dimensionnement de l'onduleur.
6. Dimensionnement des câbles.

IV.4.3.1. Evaluation du besoin en électricité (B_j)

C'est l'étude de la consommation d'énergie requise par des dispositifs utilisés (lampe machines, réfrigérateur, télévision ...), qui sont généralement connus pour chaque appareil en watts ou en calories par jour pendant les différentes périodes (été, Hiver, Vacances).

Cette évaluation est un travail préalable important impactant le dimensionnement du champ photovoltaïque et du parc de batteries. Une sous-estimation du besoin électrique provoquera des défauts de fonctionnement (coupure électrique, vieillissement prématuré des batteries), alors que sa surévaluation aura pour effet d'augmenter considérablement le coût de l'installation [61].

IV.4.3.1.1. Consommation globale de système [62]

Pour estimer la consommation globale, tout d'abord, il faut estimer : le nombre d'appareils utilisé par le consommateur, le nombre d'heure d'utilisation de chaque appareil (estimation approximative) ainsi que la puissance de chaque appareil.

- ❖ **La puissance de chaque appareil :**

$$P_i = P_n \times n_i \quad (IV.2)$$

- ❖ **La consommation énergétique de chaque appareil :**

$$E_i = P_i \times \Delta t \quad (IV.3)$$

- ❖ **Puissance des charges totale :**

$$P_{ch} = \sum_1^n P_i \quad (IV.4)$$

- ❖ **Consommation globale journalière de système :**

$$B_j = \sum_1^n E_i \quad (IV.5)$$

Avec :

P_i : Puissance de chaque appareil.

P_n : Puissance d'un seul appareil de type spécifique.

n_i : nombre d'appareil d'un seul type.

E_i : Energie journalière d'un seul type d'appareille.

Δt : Nombre d'heure d'utilisation de chaque appareil pendant une journée.

P_{ch} : Puissance de charges totale.

B_j : Consommation globale journalière de système.

IV.4.3.2. Evaluation de la puissance crête du champ photovoltaïque (P_c) [58]

❖ **Puissance crête totale du champ PV :**

$$P_{pv,tot} = \frac{B_j \times (1 + \sum p)}{N_e} \quad (IV.6)$$

Avec :

$P_{pv,tot}$: Puissance crête du champ PV (en watt crête).

E_e : L'ensoleillement pendant un certain temps, appelée nombre d'heure équivalent (l'ensoleillement varié considérablement selon la région, la saison et l'heure de la journée).

$\sum p$: Somme des pertes de l'installation (pertes due à la conversion de l'énergie, la température, l'ombrage, l'orientation et l'inclinaison).

Remarque : le « watt crête » est une mesure utilisée pour évaluer la puissance maximal qu'un panneau solaire peut générer dans des conditions optimales (conditions STC signifie « standard Test conditions », C'est un ensemble de normes qui spécifient les conditions dans lesquelles les fabricants de panneaux solaires mesurent et évaluent la performance de leurs produits).

❖ **Tension de fonctionnement du champ PV**

La tension de fonctionnement du champ photovoltaïque dépend principalement de la puissance crête du champ PV comme le montre le tableau suivant :

Puissance du champ	De 0 à 500Wc	500Wc à 2KWc	De 2KWc à 10KWc	Supérieur à 10KWc
Tension recommandée (DC) VDC-bus	12V	24V	48V	Supérieur à 48V

Tableau IV.1 : Tension recommandée pour les systèmes photovoltaïques [63].

IV.4.3.3. Dimensionnement des panneaux [38]

Le dimensionnement des panneaux photovoltaïques est une étape essentielle dans la conception d'un système PV. Il s'agit de déterminer le nombre et la taille des panneaux solaires nécessaires pour fournir la puissance électrique requise par la charge à alimenter. Les panneaux solaires peuvent être associés en série ou en parallèle pour contrôler le courant et la tension de sortie (diminution ou augmentation) en fonction des besoins de la charge à alimenter [15].

❖ **Nombre de panneaux :**

$$N_{pv} = \text{Ent} \left[\frac{P_{pv,tot}}{P_{pv,u}} \right] \quad (IV. 7)$$

Avec :

N_{pv} : Nombre de panneaux PV.

$P_{pv,tot}$: Puissance total des panneaux PV [Wc].

$P_{pv,u}$: Puissance d'un seul panneau PV [Wc].

❖ **Nombre de panneaux en série :**

$$N_{pv,s} = \text{Ent} \left[\frac{V_{ch}}{V_{mp}} \right] \quad (IV. 8)$$

Avec :

$N_{pv,s}$: nombre de panneaux PV en série.

V_{ch} : Tension de fonctionnement de champ PV.

V_{mp} : Tension à puissance maximal.

❖ **Nombre de panneaux en parallèle :**

$$N_{pv,p} = \text{Ent} \left[\frac{N_{pv,tot}}{N_{pv,s}} \right] \quad (IV. 9)$$

Avec :

$N_{pv,p}$: nombre de panneaux PV en parallèle.

$N_{pv,tot}$: Nombre de panneaux PV.

$N_{pv,s}$: Nombre de panneaux PV en série.

❖ **Nombre de panneaux PV totale :**

$$N_{pv,tot} = N_{pv,s} \times N_{pv,p} \quad (IV.10)$$

IV.4.3.4. Dimensionnement des batteries

Les batteries de stockage permettent d'optimiser la performance du système PV, d'assurer une autonomie suffisante en cas d'absence d'ensoleillement qui influence négativement sur la production directe par le champ PV, d'économiser de l'énergie et de prolonger la durée de vie de la batterie. Le dimensionnement des batteries de stockage, initialement, consiste à déterminer leur capacité de stockage qui dépend : du besoin journalier de la charge, du nombre de jour d'autonomie, de la tension de batterie unitaire, de la profondeur de charge ou de décharge et du rendement de la batterie, et puis nous devrions déterminer le nombre de batteries branchées en série, le nombre de branches en parallèle et le nombre totale de batteries que nous pourrions installer [24].

❖ **Capacité des batteries (Ah) [38]**

$$C_{batt} = \frac{B_j \times J_{aut}}{U_{batt} \times PDD \times \eta_b} \quad (IV.11)$$

Avec :

C_{batt} : Capacité nominal des batteries.

U_{batt} : Tension nominal de batteries unitaire.

J_{aut} : Jour d'autonomie.

PDD : Profondeur de décharge d'une batterie.

η_b : rendement d'une batterie.

- ❖ **Nombre de batteries [38] :**

$$N_{\text{batt}} = \text{Ent} \left[\frac{C_{\text{batt}}}{C_{\text{batt,u}}} \right] \quad (\text{IV. 12})$$

Avec :

N_{batt} : Nombre de batteries.

C_{batt} : Capacité de batteries.

$C_{\text{batt,u}}$: Capacité batterie unitaire.

- ❖ **Nombre de batteries en série [38]:**

$$N_{\text{batt,s}} = \text{Ent} \left[\frac{V_{\text{ch}}}{V_{\text{batt}}} \right] \quad (\text{IV. 13})$$

Avec :

$N_{\text{batt,s}}$: Nombre de batteries en série.

V_{ch} : tension de fonctionnement du champ PV.

V_{batt} : Tension de batteries unitaire.

- ❖ **Nombre de branches en parallèle [38]:**

$$N_{\text{batt,p}} = \text{Ent} \left[\frac{N_{\text{batt}}}{N_{\text{batt,s}}} \right] \quad (\text{IV. 14})$$

Avec :

$N_{\text{batt,p}}$: Nombre de batteries parallèle.

N_{batt} : Nombre de batteries.

- ❖ **Nombre de batteries totale [38]:**

$$N_{\text{batt,tot}} = N_{\text{batt,s}} \times N_{\text{batt,p}} \quad (\text{IV. 15})$$

IV.4.3.5. Dimensionnement de l'onduleur [38]

Le dimensionnement de l'onduleur est indispensable à la sécurité, la fiabilité, l'efficacité et la durabilité de notre installations photovoltaïque.

À condition que l'onduleur choisi soit compatible avec notre installation PV en :

- Puissance
 - Tension
 - Courant
- ❖ **Compatibilité en puissance [38] :**

Tout d'abord, Nous devrions calculée la puissance de l'onduleur, qui est estimée entre 90% à 95% de la puissance crête totale de GPV, en suite nous pourrons choisir un onduleur d'une puissance adéquate à notre installation PV.

$$P_{\text{ond}} = P_{\text{c,tot}} \times [0.90 - 0.95] \quad (\text{IV. 16})$$

Avec :

P_{ond} : Puissance de l'onduleur.

$P_{\text{c,tot}}$: Puissance crête totale (le calcul est démontrer précédemment).

- ❖ **Compatibilité en tension [38] :**

La compatibilité en tension consiste à calculer le nombre minimal et maximal des panneaux PV à insérer en série :

$$N_{\text{pv,s,min}} = \text{Ent} \left[\frac{V_{\text{oc,min,ond}}}{V_{\text{mp,pv}} \times 0.85} \right] \quad (\text{IV. 17})$$

$$N_{\text{pv,s,max}} = \text{Ent} \left[\frac{V_{\text{oc,max,ond}}}{V_{\text{mp,pv}} \times 1.25} \right] \quad (\text{IV. 18})$$

Avec :

$N_{pv,s,min}$: Nombre minimal des panneaux PV en série.

$V_{oc,min,ond}$: Tension de court-circuit minimal de l'onduleur.

$V_{mp,pv}$: Tension à puissance maximal de panneau.

$N_{pv,s,max}$: Nombre maximal des panneaux PV en parallèle.

$V_{oc,max,ond}$: Tension de court-circuit maximal de l'onduleur.

❖ **Compatibilité en courant [38] :**

La compatibilité en courant consiste à calculer le nombre maximal des panneaux PV à insérer en parallèle :

$$N_{pv,p,max} = \text{Ent} \left[\frac{I_{max,ond}}{I_{mp,pv} \times 1.25} \right] \quad (IV.19)$$

Avec :

$N_{pv,p,max}$: Nombre maximal des panneaux en parallèle.

$I_{max,ond}$: Courant nominal de l'onduleur.

$I_{mp,pv}$: Courant à puissance maximal de panneau.

IV.4.3.6. Dimensionnement des câbles [38] [24]

Le dimensionnement des câbles est une étape importante dans la conception d'une installation photovoltaïque. Les câbles sont responsables de la transmission de l'énergie électrique produite par les panneaux PV vers l'onduleur et vers tous les dispositifs de l'installation. Une mauvaise sélection ou installation des câbles peut entraîner des pertes d'énergie, des surchauffes et même des incendies. Le dimensionnement des câbles dépend de plusieurs facteurs, tels que la distance entre les panneaux PV et l'onduleur, la tension de fonctionnement (généralement : 12V,24V,48V), la température ambiante.

Le dimensionnement des câbles dans les installations PV est partagé en deux parties :

1. Section des câbles côté DC

Est la section des câbles entre :

- Le GPV et la boîte de raccordement (boîte de jonction).

- La boîte de raccordement et le régulateur.
- Le DC/DC et les batteries.

2. Section des câbles côté AC :

- Est la section des câbles entre l'onduleur et la charge alimentée par notre système.

IV.4.3.6.1. Section des câbles côté DC

❖ Section des câbles entre un panneau et la boîte de raccordement :

$$I = 1.25 \times I_{cc} \quad (IV.20)$$

$$S = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta V \times V} \quad (IV.21)$$

Avec :

I : intensité de courant

I_{cc} : courant de court-circuit

S : section des câbles.

ρ : résistivité électrique.

L : longueur du câble.

ΔV : chute de tension.

V : tension de fonctionnement.

❖ Section des câbles entre La boîte de raccordement et le régulateur :

$$I = I_{mp} \times N_{pv} \quad (IV.22)$$

$$S = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta V \times V} \quad (IV.23)$$

Avec :

Ce sont des grandeurs définissez précédemment.

❖ **Section des câbles entre le DC/DC et les batteries.**

$$V_{\text{batt}} = V_{\text{batt,u}} \times N_{\text{batt,s}} \quad (\text{IV. 24})$$

$$1 - \alpha = \frac{V_{\text{batt}}}{V_{\text{pv}}} \quad (\text{IV. 25})$$

$$I_{\text{batt}} = \frac{I}{1 - \alpha} \quad (\text{IV. 26})$$

$$S = \frac{\rho \times L \times I_{\text{batt}}}{\Delta V \times V_{\text{batt}}} \quad (\text{IV. 27})$$

Avec :

V_{batt} : tension du parc des batteries.

$V_{\text{batt,u}}$: tension de batteries unitaire.

$N_{\text{batt,s}}$: nombre de batteries en série.

I_{batt} : courant des batteries.

α : rapport cyclique.

IV.4.3.6.2. Section des câbles coté AC [38]

Est la section des câbles entre l'onduleur et la charge alimentée par notre système :

$$I_{\text{B}} = \frac{P_{\text{ch}}}{3 \times V} \quad (\text{IV. 28})$$

$$S = \beta \times \rho_{\text{cu}} \times \frac{L \times \text{COS}\delta \times I_{\text{B}}}{\Delta V} \quad (\text{IV. 29})$$

Avec :

P_{ch} : Puissance de la charge.

I_B : courant maximal d'emploi.

β : coefficient mathématique (**$\beta = 1$** en monophasée, **$\beta = 2$** en triphasée).

ρ_{cu} : la résistivité de matériau (généralement : le cuivre)

$\cos\delta$: Facteur de puissance.

Partie II : Etude et réalisation d'une installation photovoltaïque autonome avec l'entreprise « MSE : Mounir Solar Energy »

IV.1. Présentation du projet

Notre projet consiste à réaliser une installation photovoltaïque de type off-grid ou bien autonome, avec un système de stockage contenant des batteries, qui assure le bon fonctionnement de système, plus précisément pendant la nuit, pour une entreprise privée qui porte le nom « SARL SOXIMAT DEPOT », est un dépôt utilisé pour l'importation de bois et de lièges. Ce dépôt est située à Remila-sidi aich, wilaya de Bejaia, dans un lieu isolé, le raccordement de ce dépôt vers un réseau électrique public est assez chère par rapport à une installation photovoltaïque qui suffira le besoin d'alimentation en électricité de tout dispositifs utilisés par le client.



Figure IV.2 : description illustrative de dépôt.

IV.2. Coordonnées géographiques du lieu de projet

- Latitude : 36.650517° N
- Longitude : 4.735338° E

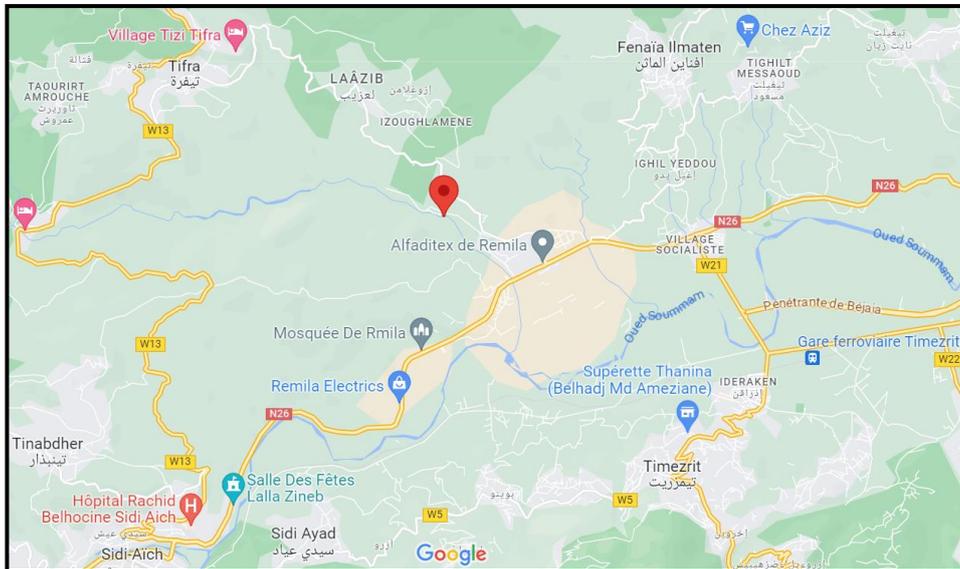


Figure IV.3 : Emplacement du lieu géographiquement [64].



Figure IV.4 : Image satellite du dépôt du bois [64].

IV.3. Estimation de la consommation journalière de dépôt

Le dépôt contient une loge pour la gestion de travail et la surveillance et deux espaces de stockages (a) et (b), sachant que le (a) est plus spacieux et plus grand que le (b).

Désignation	Les charges	Nombre	Puissance de chaque appareil (W)	Puissance (W)	Durée d'utilisation (h)	Energie journalière (Wh)
Le bureau de gestion de travail et du surveillance	Lampe	2	20	40	8h	320
	Imprimante	1	25	25	1h	25
	Micro-ordinateur	2	150	300	8h	2400
	Mini-Frigo	1	140	140	8h	1120
L'espace de stockage (a)	Lampe	10	20	200	8h	1600
L'espace de stockage (b)	Lampe	1	20	20	3h	60

Tableau IV.2 : Consommation journalière de dépôt.

Remarque

- Les lampes (lampes à LED de 10 watts) et tout autre type des dispositifs utilisées sont économiseurs d'énergie.

IV.4. Etapes de dimensionnement de l'installation

Ces étapes concernent le processus de dimensionnement de notre système photovoltaïque :

1. Le nombre de panneaux photovoltaïques qui garantit le bon fonctionnement de système électrique de l'école primaire (EPV journalière > besoin journalier de dépôt).
2. Le nombre de batteries nécessaires qui assure la fourniture d'énergie électrique en cas d'absence d'ensoleillement (nuit).
3. La désignation de type de l'onduleur à utiliser pour notre système PV.

Besoin journalière B_j (Wh/j)	5525
Puissance de panneau PV (W)	300
Tension du bus continu U_{batt} (V)	24
Nombre de jour d'autonomie J_{aut} (J)	1
Rendement de la batterie η_b	0.85
La profondeur de décharge des batteries PDD	0.85
Les pertes p (%)	30%
Nombre d'heure équivalent E_e (h)	4
Capacité nominale des batteries C_{batt} (Ah)	150

Tableau IV.3 : Les caractéristiques de notre système PV.

IV.4.1. Evaluation du besoin électrique

- Puissance des charges totale :

$$P_{ch} = \sum_1^n P_i = 725 \text{ W} \quad (\text{IV. 30})$$

- Besoin journalier du dépôt :

$$B_j = \sum_1^n E_i = 5525 \text{ Wh/J} \quad (\text{IV. 31})$$

IV.4.2. La puissance crête du champ photovoltaïque (W_C)

Le Calcul de la puissance crête totale :

$$P_{pv,tot} = \frac{B_j \times (1 + \sum p)}{N_e} = \frac{5525 \times (1 + 0.3)}{4} = 1795.625 \text{ W}_C \quad (\text{IV. 32})$$

- Notre installation devra produire une puissance photovoltaïque de « **1795.625 W_C** » ou plus pour assurer le besoin en électricité de dépôt.
- La tension de fonctionnement du champ photovoltaïque est choisie principalement en fonction de la puissance crête du champ, donc :

Puissance du champ	De 0 à 500Wc	500Wc à 2KWc	De 2KWc à 10KWc	Supérieur à 10KWc
Tension recommandée (DC) VDC-bus	12V	24V	48V	Supérieur à 48V

Tableau IV.4 : Tensions recommandées pour les systèmes photovoltaïques en fonction de leurs Puissances.

- ✓ Pour notre cas, la tension de fonctionnement du champ PV est : **24V**.

IV.4.3. Dimensionnement des panneaux photovoltaïques

Dans cette partie de dimensionnement, nous devrions calculer le nombre de modules PV que nous devrions placée pour atteindre la puissance totale du champ photovoltaïque, en passant par :

- Le calcul de nombre de panneaux
- Le calcul de nombre de panneaux totale.
- Le câblage des panneaux PV (qui dépend de l'onduleur).

Le module utilisé dans notre système PV est de type « **AS R04-280PERC** », d'une puissance optimal **Pc = 300 Wc**.

Puissance nominale Pmp (Wc)	300
Tension a puissance max. Vmp (V)	33.52
Courant a puissance max. Imp (A)	9.19
Tension en circuit ouvert Voc (V)	39.56
Courant de court-circuit Isc (A)	9.51
Quantité de cellules	60
Tension maximale système (V)	1000
Maximum courant inverse (A)	15

Tableau IV.5 : la fiche technique de panneau PV utilisée, sous forme d'un tableau.

❖ Nombre de panneaux :

$$N_{pv} = \text{Ent} \left[\frac{P_{pv,tot}}{P_{pv,u}} \right] = \frac{1795.625}{300} = 6 \text{ panneaux} \quad (\text{IV. 33})$$

❖ Nombre de panneaux en série :

$$N_{pv,s} = \text{Ent} \left[\frac{V_{ch}}{V_{mp}} \right] = \frac{24}{33.52} = 2 \text{ panneaux} \quad (\text{IV. 34})$$

❖ Nombre de branches en parallèles :

$$N_{pv,p} = \text{Ent} \left[\frac{N_{pv,tot}}{N_{pv,s}} \right] = \frac{6}{2} = 3 \text{ panneaux} \quad (\text{IV. 35})$$

❖ Nombre de panneaux totale :

$$N_{pv,tot} = N_{pv,s} \times N_{pv,p} = 2 \times 3 = 6 \text{ panneaux} \quad (\text{IV. 36})$$

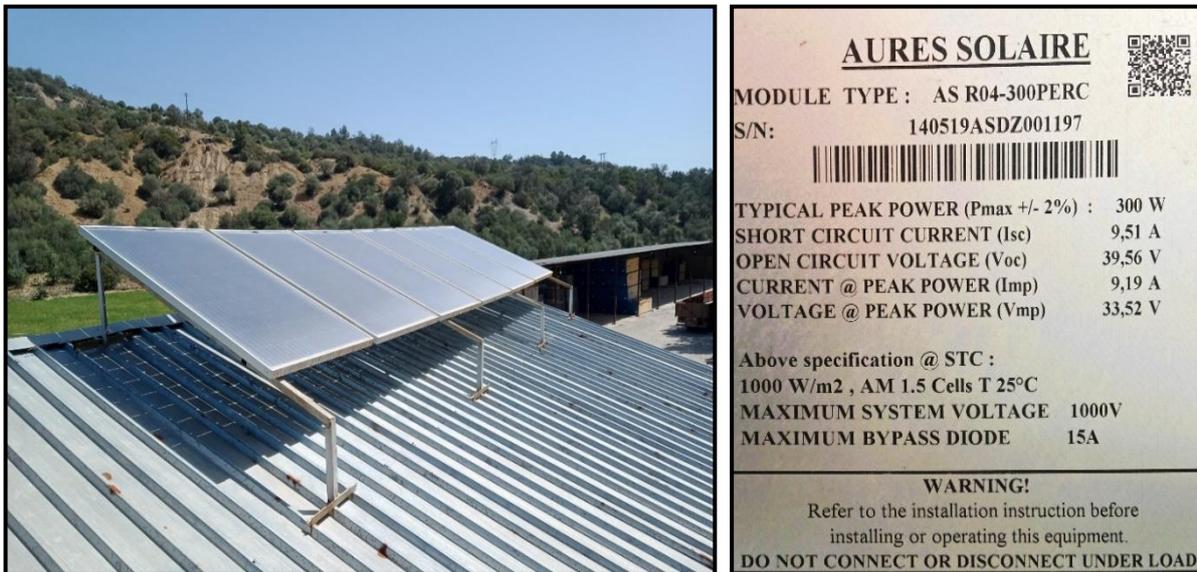


Figure IV.5 : Image des six panneaux PV installé, et leur fiche technique.

IV.4.4 Dimensionnement des batteries :

Avant de procéder au dimensionnement des batteries, il est nécessaire de déterminer le modèle de batterie qui sera utilisé dans notre système de stockage, en particulier la capacité de la batterie choisie.

Pour notre système de stockage nous avons choisi une batterie d'une capacité de « $C_{\text{batt,u}} = 150 \text{ Ah}$ ».

Capacité nominal (Ah)	150
Tension (V)	12
Résistance interne (mΩ)	7
Durée (ans)	10

Tableau IV.6 : fiche technique de la batterie utilisée dans l'installation, sous forme d'un tableau.

❖ **Capacité des batteries**

$$C_{\text{batt}} = \frac{B_j \times J_{\text{aut}}}{U_{\text{batt}} \times \text{PDD} \times \eta_b} = \frac{5525 \times 1}{12 \times 0.85 \times 0.85} = 637.25 \text{ Ah} \quad (\text{IV.37})$$

❖ **Nombre de batteries**

$$N_{\text{batt}} = \text{Ent} \left[\frac{C_{\text{batt}}}{C_{\text{batt,u}}} \right] = \frac{637.25}{150} = 4 \text{ Batteries} \quad (\text{IV.38})$$

❖ **Nombre de batteries en série :**

$$N_{\text{batt,s}} = \text{Ent} \left[\frac{V_{\text{ch}}}{V_{\text{batt}}} \right] = \frac{24}{12} = 2 \text{ batteries} \quad (\text{IV.39})$$

❖ **Nombre de batteries en parallèle :**

$$N_{\text{batt,p}} = \text{Ent} \left[\frac{N_{\text{batt}}}{N_{\text{batt,s}}} \right] = \frac{4}{2} = 2 \text{ batteries} \quad (\text{IV.40})$$

❖ **Nombre de batteries totales :**

$$N_{\text{batt,tot}} = N_{\text{batt,s}} \times N_{\text{batt,p}} = 2 \times 2 = 4 \text{ batteries} \quad (\text{IV.41})$$

❖ **Câblage des batteries :**

Afin d'obtenir une tension de 24V, nous avons deux branches dans notre installation, avec chaque branche comprenant deux batteries en série. Au total, notre installation contient 4 batteries.



Figure IV.6 : Image des quatre batteries branchées en série et en parallèle.

IV.4.5. Dimensionnement de l'onduleur

Le dimensionnement de l'onduleur est une étape qui nécessite une compatibilité sur et juste avec les équipements à alimenter :

IV.4.5.1. Compatibilité en puissance :

❖ **La puissance crête totale des panneaux :**

$$P_{\text{c,tot}} = P_{\text{pv,u}} \times N_{\text{pv,tot}} = 300 \times 6 = 1800 \text{ W}_C \quad (\text{IV.42})$$

❖ **La puissance de l'onduleur :**

La puissance de l'onduleur est estimée entre 90% et 95% de la puissance crête totale calculée précédemment :

$$\begin{aligned} P_{\text{ond}} &= P_{\text{c,tot}} \times [0.90 - 0.95] && \text{(IV.43)} \\ &= 1800 \times [0.9 - 0.95] \\ &= [1620 - 1710] \end{aligned}$$

Il s'ensuit que la puissance de l'onduleur de notre installation est de : **2KW**

✓ « Compatible en puissance ».

Remarque : Puisque ça n'existe pas réellement un onduleur de 1.7KW, nous avons choisi un onduleur d'une puissance supérieur à celle qu'on a obtenu comme résultat (P_{ond}) qui suffira le besoin de notre installation.

➤ L'onduleur choisi est de type : **RG-MS2000-24**, de marque : **RAGGIE** :

Rated power	2000VA/2000W
DC input	24VDC, 96A
AC, output	230VAC, 50/60Hz
MPPT Rag (Operating Voltage)	30VDC – 115VDC
Maximum solar voltage (Voc)	145VDC
Maximum Solar Charge Current	80A
System voltage	24VDC

Tableau IV.7 : fiche technique de l'onduleur utilisée dans notre installation, sous forme d'un tableau.



MODEL	RG-MS 1K-24	RG-MS 1K-48	RG-MS 2K-48	RG-MS 3K-24	RG-MS/LI 3K-24	RG-MS/LI 3K-48	RG-MS/LI 4K-48	RG-MS/LI 5K-48	RG-MS/LI 5K-24	
Rated Power	1000VA/1000W	1000VA/1000W	2000VA/2000W	3000VA/3000W	3000VA/3000W	3000VA/3000W	4000VA/4000W	5000VA/5000W	5000VA/4000W	
Parallel Capability	NO	NO	NO	NO	NO	NO	Yes, 9 units	Yes, 9 units	Yes, 9 units	
INPUT										
Voltage	230 VAC									
Selectable Voltage Range	170-280 VAC (For Personal Computers) ; 90-280 VAC (For Home Appliances)									
Frequency Range	50 Hz/60 Hz (Auto sensing)									
OUTPUT										
AC Voltage Regulation (Ref. Mode)	230VAC ± 5%									
Burge Power	2000VA	4000VA	6000VA	8000VA	10000VA					
Efficiency (Peak)	90%	93%	93%	90%	93%					
Transfer Time	10 ms (For Personal Computers) ; 20 ms (For Home Appliances)									
Waveform										
Pure sine wave										
BATTERY										
Battery Voltage	24 VDC	48 VDC	24 VDC	24 VDC	48 VDC	48 VDC	48 VDC	48 VDC	24 VDC	
Trailing Charge Voltage	27 VDC	54 VDC	27 VDC	27 VDC	54 VDC	54 VDC	54 VDC Max. 8VDC (Optional 6VDC, please check with sales)	54 VDC	24 VDC	
Overcharge Protection	31 VDC	62 VDC	31 VDC	31 VDC	62 VDC	62 VDC	60 VDC (Optional 66VDC please check with sales)	62 VDC	30 VDC	
SOLAR CHARGER & AC CHARGER										
Maximum PV Array Power	600W	900W	600W	600W	1000W	900W	4000W	2000W	2000W	
MPPT Reg. @ Standard Voltage	30VDC	60VDC	30VDC	30VDC	30VDC	60VDC	60VDC	60VDC	30VDC	
Maximum PV Array Open Circuit Voltage	75VDC	150VDC	75VDC	75VDC	100VDC	102VDC	145VDC	115VDC	75VDC	
Maximum Solar Charge Current	25A	18A	25A	25A	40A	18A	80A	80A	80A	
Maximum AC Charge Current	20A	15A	30A	30A	60A	15A	60A	60A	60A	
Maximum Charge Current	45A	33A	55A	55A	100A	33A	140A	140A	140A	
Ready Power Consumption	98%									
Standby Power Consumption	2W									
PHYSICAL										
Dimensions, D x W x H (mm)	100 x 272 x 355			120 x 295 x 365		120 x 295 x 468		120 x 295 x 468		180 x 310 x 475
Net Weight (kgs)	6.8			7.0		7.4		12.5		13.5
ENVIRONMENT										
Humidity	5% to 95% Relative Humidity (Non-condensing)									
Operating Temperature	0°C - 55°C									
Storage Temperature	-15°C - 60°C									

Figure IV.7 : L'onduleur de 2KW insérée dans l'installation PV et sa fiche technique. [65]

IV.4.5.2. Compatibilité en tension

❖ Nombre de panneaux minimal en série :

$$N_{pv,s,min} = \text{Ent} \left[\frac{V_{oc,min,ond}}{V_{mp,pv} \times 0.85} \right] = \text{Ent} \left[\frac{30}{33.52 \times 0.85} \right] = 2 \quad (IV.44)$$

❖ Nombre de panneaux maximal en série :

$$N_{pv,s,max} = \text{Ent} \left[\frac{V_{oc,max,ond}}{V_{mp,pv} \times 1.25} \right] = \text{Ent} \left[\frac{145}{33.52 \times 1.25} \right] = 3 \quad (IV.45)$$

✓ « Compatible en tension ».

IV.4.5.3. Compatibilité en courant

- ❖ **Nombre de panneaux en parallèle :**

$$N_{pv,p,max} = \text{Ent} \left[\frac{I_{max,ond}}{I_{mp,pv} \times 1.25} \right] = \text{Ent} \left[\frac{80}{9.19 \times 1.25} \right] = 6 \quad (\text{IV. 46})$$

✓ « Compatible en courant ».

- ❖ **Câblage des panneaux PV :**

Par conséquent, nous avons 6 panneaux placée en 6 branches dans chaque branche un seul panneau.

IV.4.6. Dimensionnement des câbles :

- ❖ **Entre le GPV et la boîte de raccordement :**

On a une longueur de 1.5m (L=1.5m) :

$$I = 1.25 \times I_{cc} = 1.25 \times 9.51 = 11.88 \text{ A} \quad (\text{IV. 47})$$

$$S = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta V \times V} = \frac{1.6 \times 10^{-8} \times 1.5 \times 11.88}{0.02 \times 33.52} = 0.425 \text{ mm}^2 \quad (\text{IV. 48})$$

$$S = 0.425 \text{ mm}^2 \Rightarrow S_c = 1.5 \text{ mm}^2 \quad (\text{II. 49})$$

Remarque :

- **S** : Est la section des câbles théorique (n'existe pas réellement sur le marché).
- **S_c** : Est la section des cables commercial (existe réellement sur le marché).

- ❖ **Entre la boîte de raccordement et le régulateur DC/DC :**

On a une distance de 7m (L=7m)

$$I = I_{mp} \times N_{pv} = 9.19 \times 6 = 53.52 \text{ A} \quad (\text{IV.50})$$

$$S = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta V \times V} = \frac{1.6 \times 10^{-8} \times 7 \times 53.52}{0.02 \times 33.52} = 9 \text{ mm}^2 \quad (\text{IV.51})$$

$$S = 9 \text{ mm}^2 \Rightarrow S_c = 10 \text{ mm}^2 \quad (\text{IV.52})$$

❖ **Entre la partie DC/DC et les batteries**

Pour une distance de 1.5m (L=1.5m) :

$$V_{batt} = V_{batt,u} \times N_{batt,s} = 12 \times 2 = 24 \text{ V} \quad (\text{IV.53})$$

$$1 - \alpha = \frac{V_{batt}}{V_{pv}} = \frac{24}{33.52} = 0.72 \quad (\text{IV.54})$$

$$I_{batt} = \frac{I}{1 - \alpha} = \frac{53.52}{0.72} = 74.33 \text{ A} \quad (\text{IV.55})$$

$$S = \frac{\rho \times L \times I_{batt}}{\Delta V \times V_{batt}} = \frac{1.6 \times 10^{-8} \times 2 \times 74.33}{0.02 \times 24} = 4.955 \text{ mm}^2 \quad (\text{IV.56})$$

$$S = 4.955 \text{ mm}^2 \Rightarrow S_c = 6 \text{ mm}^2 \quad (\text{IV.57})$$

❖ **Section des câbles coté AC (entre l'onduleur et la charge) :**

Pour une distance de 4m (L=4m)

$$I_B = \frac{P_{ch}}{3 \times V} = \frac{725}{3 \times 230} = 1.05 \text{ A} \quad (\text{IV.58})$$

$$S = \beta \times \rho_{cu} \times \frac{L \times \cos\delta \times I_B}{\Delta V} \quad (IV.59)$$

$$= 2 \times 0.0225 \times \frac{3 \times 0.8 \times 1.05}{0.02} = 5.67 \text{ mm}^2$$

$$S = 5.67 \text{ mm}^2 \Rightarrow S_c = 6 \text{ mm}^2 \quad (IV.60)$$

IV.5. Le système de protection de notre installation photovoltaïque :

Le système de protection des installations PV est utilisé contre d'éventuels risques électriques afin de protéger les personnes et le matériel, généralement, est sous forme des coffrets coté AC et coté DC séparément, Le coffret DC et le coffret AC sont installés respectivement en amont et en aval de l'onduleur.

En raison de minimiser le cout de l'installation, qui est assez élevée par rapport à sa production, l'entreprise « **MSE : Mounir Solar Energy** » installe une seul armoire électrique contenant le coté AC et DC séparément, avec tout autre type d'appareillages de protection comme le montre la figure (IV.7).

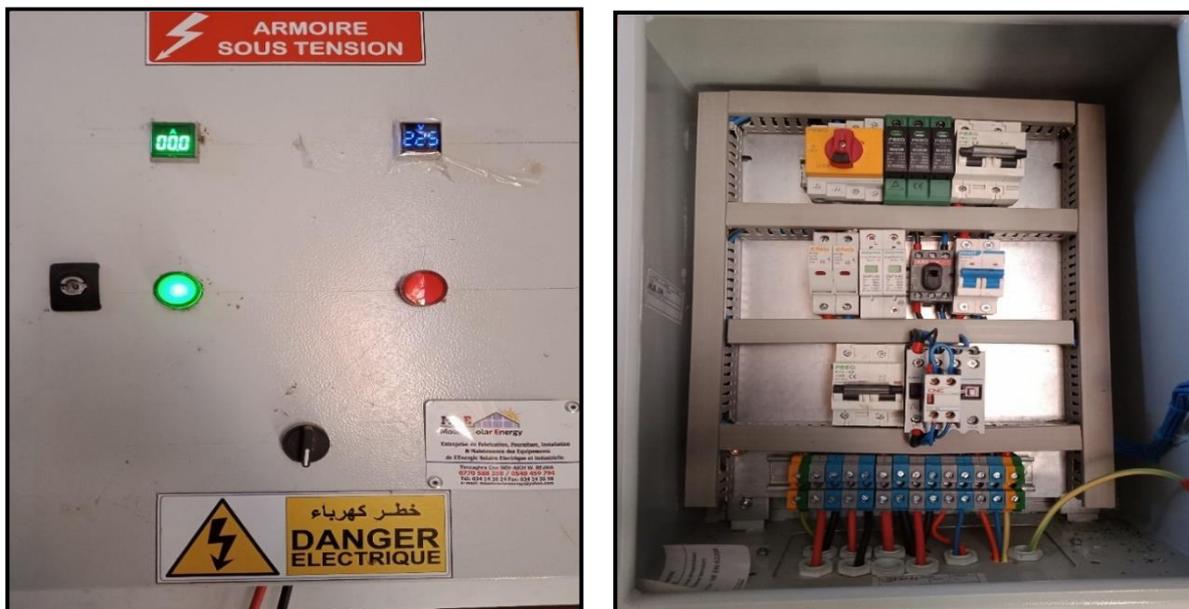


Figure IV.8 : le design et l'architecture de l'armoire électrique utilisée pour la protection de notre système PV.

IV.5.1. Différents éléments de protection utilisée pour la réalisation de l'armoire

L'armoire électrique est équipée de différents dispositifs qui sont conçus pour détecter toute anomalie dans le système et couper automatiquement l'alimentation électrique pour éviter tout dommage aux composants de système, pour cela nous avons utilisée dans l'armoire les dispositifs suivants :

- **Un sectionneur** : C'est un appareil destiné à ouvrir et à fermer un circuit à vide. Le sectionneur n'est pas destiné à couper en charge, son rôle est d'établir une coupure visible du circuit.
- **Un parafoudre DC** : C'est un composant qui vient sécuriser l'installation électrique, ainsi que les appareils, en cas de surtension provoquée par la foudre dans le système solaire. Son emplacement d'installation est recommandé aux deux extrémités de la ligne d'alimentation en courant continu (côté panneau solaire et côté onduleur/convertisseur).
- **Un parafoudre AC** : C'est un dispositif de protection contre les surtensions qui protège les systèmes électriques.
- **Un disjoncteur** : Un disjoncteur est un dispositif électromécanique, voire électronique, de protection dont la fonction est d'interrompre le courant électrique en cas d'incident sur un circuit électrique. Il est capable d'interrompre un courant de surcharge ou un courant de court-circuit dans une installation.
- **Un disjoncteur différentiel** : Un disjoncteur différentiel est un dispositif de sécurité de l'installation qui compare à chaque instant le courant entrant et le courant sortant.
- **Une porte fusible + Fusible** : Un fusible est un appareil qui, par la fusion d'un ou plusieurs de ses éléments conçus et calibrés à cet effet, ouvre le circuit dans lequel il est installé en interrompant le courant lorsque celui-ci dépasse pendant un temps suffisant une valeur donnée.
- **Un interrupteur-sectionneur** : C'est un appareil qui garantit la séparation, il peut ou non être équipés de dispositifs de condamnation en position d'ouverture (voir sectionneur).
- **Un mini-Disjoncteur** : également appelé disjoncteur modulaire, est un dispositif de protection électrique utilisé pour protéger les circuits électriques contre les surcharges et les courts-circuits.
- **Une partie conçue pour la commande** : cette partie de commande est utilisée pour contrôler, surveiller et protéger les différents composants du système, elle est constituée d'un disjoncteur différentiel et un contacteur.

- **Contacteur** : Le contacteur est un appareil qui commande électromagnétiquement l'ouverture et la fermeture d'un circuit en charge.

IV.6. Devis estimatif total de l'installation PV

Chaque étude technique est accompagnée d'un devis estimatif et quantitatif composant d'un prix unitaire et total de chaque équipement pour avoir une estimation financière d'une installation.

IV.6.1. Devis estimatif total des panneaux

Type de panneaux	Nombre de panneaux	Prix unitaire (DA)	Prix total (DA)
AS R04-300PERC	6	25000	150000

Tableau IV.8 : Devis estimatif des panneaux.

IV.6.2. Devis estimatif total des batteries

Type de batteries	Nombre de panneaux	Prix unitaire (DA)	Prix total (DA)
UPG150-12 (12V150Ah/20hr)	8	43000	344000

Tableau IV.9 : Devis estimatif des batteries.

IV.6.3. Devis estimatif total des câbles électriques utilisée

Cable électrique	Longueur	Prix unitaire (DA)	Prix total (DA)
Cable de $2 \times 1.5 \text{ mm}^2$	3m	75	225
Cable de $2 \times 10 \text{ mm}^2$	14m	300	4200
Cable de $2 \times 6 \text{ mm}^2$	3m	250	750
Cable de $2 \times 6 \text{ mm}^2$	8m	250	2000
			7175

Tableau IV.10 : Devis estimatif des câbles électriques utilisée.

IV.6.4. Devis estimatif total des onduleurs

Type d'onduleur	Nombre d'onduleur	Prix unitaire (DA)	Prix total (DA)
RG-MS (2000VA/2000W)	1	108000	108000

Tableau IV.11 : Devis estimatif des onduleurs.

IV.6.5. Devis estimatif total de l'armoire électrique

Dispositifs	Nombre utilisée	Prix (DA)	Prix totale
Armoire	1	6000	6000
Voyants rouge et vert	2	100	200
Goulotte perforé	1	700	700
Commutateur	1	250	250
Etiquette	3	70	210
Ampèremètre	1	550	550
Voltmètre	1	250	250
Sectionneurs	1	6500	5000
Interrupteur-sectionneur	1	4800	4800
Disjoncteurs	3	4500	9300
Porte fusible + fusible	2	210	1600
Contacteur	1	1900	1900
Parafoudre	1	6800	6800
			37560

Tableau IV.12 : Devis estimatif total de l'armoire électrique.

IV.6.6. Devis estimatif total de l'installation photovoltaïque

Eléments	Prix (DA)
Structure porteuse des panneaux	4500
Panneaux	15000
Structure porteuse des batteries	1200
Batteries	344000
Onduleur	108000
Câbles électrique	7175
Armoire électrique	37560
Main d'œuvre	177500
Prix totale (DA)	694935

Tableau IV.13 : Devis estimatif de l'installation photovoltaïque.

- Après avoir réalisé une installation photovoltaïque qui alimente les différents éléments souhaités, nous devrions réviser le montant ou le devis estimatif total et unitaire (le coût de tout type de dispositifs utilisés et la main d'œuvre) de notre système PV, pour but de :
- **L'évaluation des coûts** : un devis estimatif permet d'estimer les coûts totaux de l'installation PV, y compris les équipements, la main-d'œuvre, les matériaux et les éventuels frais supplémentaires.
 - **La comparaison des options** : Un devis estimatif permet de comparer les différentes options disponibles, que ce soit pour les panneaux solaires, les onduleurs, les batteries ou d'autres composants.
 - **Préparation financière** : Un devis estimatif permet de se préparer financièrement en ayant une idée claire des coûts associés à l'installation PV.

En effet, dans une installation photovoltaïque, les panneaux solaires et les batteries de stockage, représentent généralement la partie la plus coûteuse du système.

IV.8. Elaboration du schéma global de notre système photovoltaïque installé

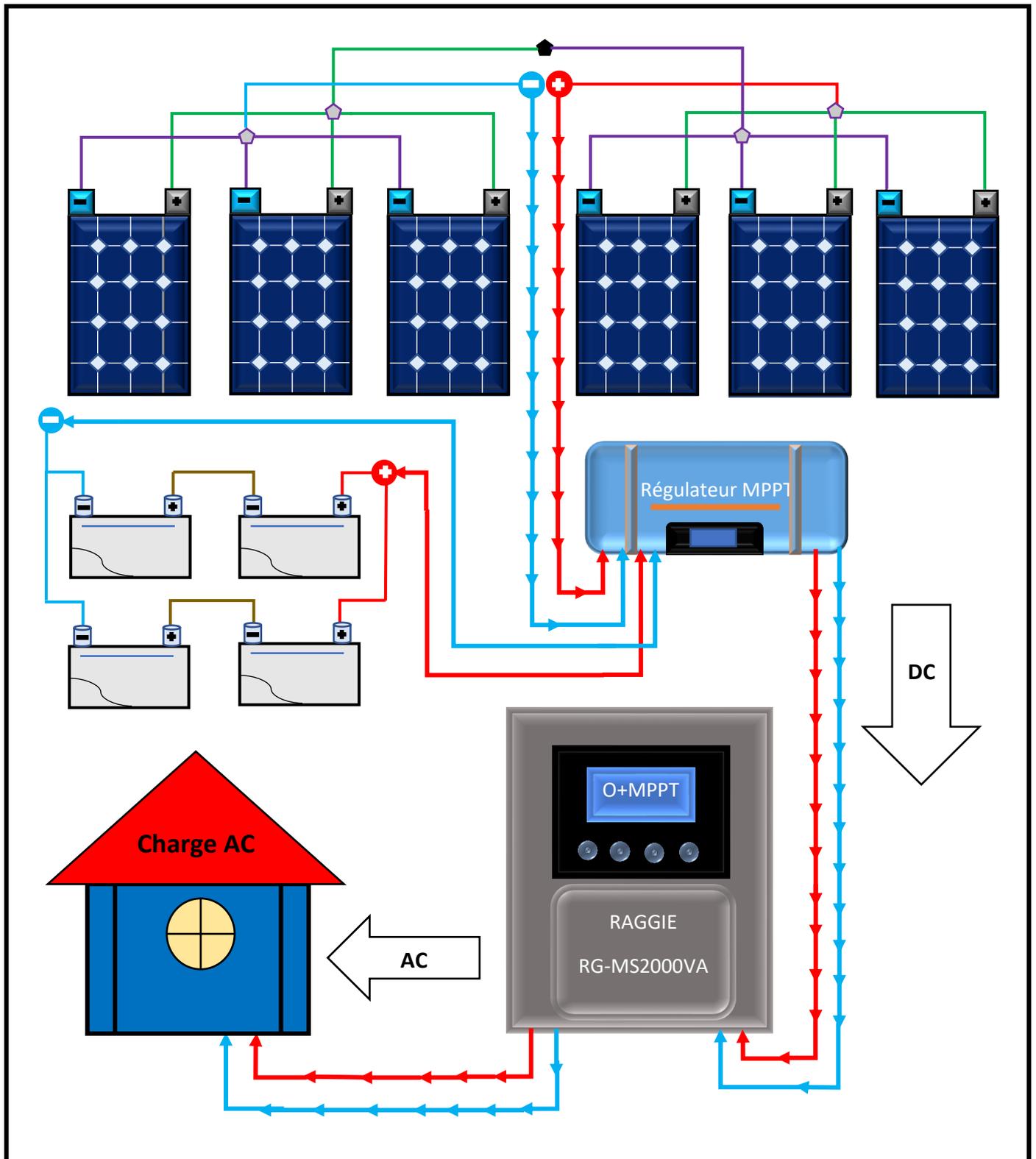


Figure IV.9 : schéma globale de l'installation photovoltaïque.

IV.8. Conclusion

Le dimensionnement est considéré comme une étape primordiale pour l'optimisation des installations photovoltaïques, dans ce chapitre, nous avons présenté le dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome munie d'un système de stockage (batteries), théoriquement et pratiquement, en expliquant l'importance des méthodes de dimensionnement et leurs choix, les différentes étapes de dimensionnement, les éléments les plus importants à prendre en compte lors d'un dimensionnement et le devis estimatif de l'installation effectué pratiquement pour le dépôt de stockage des matériaux, avec l'entreprise « **MSE** ».

Conclusion générale

Conclusion générale

Il est facile de justifier notre choix de problématique, car l'amélioration de la production d'énergie dans les systèmes à énergies renouvelables, en particulier les systèmes photovoltaïques, reste un enjeu majeur et ouvre un vaste champ de recherche [66].

L'objectif de cette étude était la présentation et l'analyse de tout un système photovoltaïque autonome munie d'un système de stockage sous différentes conditions, ainsi que son dimensionnement.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une description générale des systèmes photovoltaïques : l'énergie photovoltaïque en général, les systèmes de stockage, différents composants complémentaires du système qui assurent l'adaptation et la transmission d'énergie, ainsi que les éléments nécessaires pour la protection des systèmes photovoltaïque qui dépend d'un système à un autre.

Représenter un système réel à l'aide de concepts mathématique ou informatique est une méthode qui permet l'étude des différents comportements et caractéristiques du système souhaité. Dans le deuxième chapitre, nous avons utilisé le logiciel de simulation "MATLAB SIMULINK" basé sur une approche mathématique et informatique, pour analyser et prédire le comportement des composants principaux d'un système photovoltaïque autonome avec stockage sans l'application de la commande de poursuite de point de puissance maximal MPPT, en effet, les générateurs PV perdent leur performance et affecte par une diminution remarquable de leur rendement sans le régulateur de charge MPPT. Dans des sites mal rayonnés ou dont la température est élevée, nous n'aurons pas la capacité d'exploiter le maximum de la conversion photovoltaïque.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté un travail sous forme d'une réponse à la problématique rencontrée dans le deuxième chapitre, par l'analyse de l'influence de la commande MPPT sur la production d'un générateur photovoltaïque sous différentes conditions météorologiques et différentes méthodes de commande de régulateur de charge MPPT, pour but de l'optimisation de notre système PV avec une manière efficace et une production optimale, ceci est défini par le bon choix de type de la commande MPPT appliqué pour le système étudié, car chaque méthode a ses spécificités dont son fonctionnement est maximal ou idéal.

Le quatrième chapitre est consacré pour une étape Incontournable avant la réalisation d'une installation photovoltaïque dont nous avons effectué un dimensionnement pour une installation photovoltaïque autonome. Le dimensionnement sert à déterminer attentivement le nombre des panneaux, des batteries, des onduleurs ainsi que la section des câbles... Pour une réalisation complète, efficace et moins coûteuse, en effet, le dimensionnement est une étude du coût d'investissement des systèmes et peut être aussi considérée comme une méthode d'optimisation préventive, car elle vise à garantir que le système PV est conçu et dimensionné de manière adéquate dès le départ, afin de maximiser la performance, la fiabilité et la durabilité du système tout au long de son cycle de vie.

En perspective à ce travail, il serait passionnant d'appliquer d'autres méthodes de la commande MPPT, comme la technique des réseaux de neurones ou les techniques de l'intelligence artificielle, car elles offrent une grande alternative pour résoudre des problèmes complexes.

Références bibliographiques

- [1] L.Croci, « gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/super-condensateurs », Thèse de doctorat de l'université de poitiers, 2013.
- [2] K. Zaouche, Etude et Développement de Différentes Méthodes MPPT pour un Système Photovoltaïque, mémoire de magister, université des sciences et de la technologie houari Boumediene. 2009, Algérie.
- [3] Robert Foster, Majid Ghassemi, Amir H, « Solar Energy : Renewable Energy and the Environment ». Shooshtari, 2017.
- [4] Roger Messenger, Jerry Ventre, « Photovoltaic Systems Engineering ». CRC Press, 2017.
- [5] Lintern@ute. Le 12 mars 2023.
<https://www.linternaute.fr/dictionnaire/fr/definition/soleil/>
- [6] COSMOS - The SAO Encyclopedia of Astronomy – The Sun. The Centre for Astrophysics and Supercomputing (Australia), CASMOS. CoMars 2023. Le 15 mars 2023.
<https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/S/Sun>
- [7] CEA – Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. Récupéré le 26 mars 2023.
<https://www.cea.fr/>
- [8] CONNAISSANCE des ENERGIES. Le 02 avril 2023.
<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire>
- [9] Opera energie. Le 06 avril 2023.
<https://opera-energie.com/energie-solaire/>
- [10] monkitsolaire. 08 avril 2023.
<https://www.monkitsolaire.fr/blog/quel-type-de-panneau-solaire-choisir--n229>

- [11] FARES Abdellatif, BOUCHELACHEM Abdelmoncef, « Contribution à l'étude d'un système aérovoltaique ». PFE,2021.
- [12] AYACHE IDIR, « Etude et contrôle d'un système photovoltaïque en fonctionnement Autonome ». Mémoire de fin d'étude 2020.
- [13] IRL France. Le 10 avril 2023.
<https://www.irl-france.fr/fr/decouvrir-les-infrarouges-lointains/le-rayonnement-du-soleil-explique-par-irl-France>
- [14] GUEDJALI Sofiane, AROUN Kenza, « Fonctionnement autonome d'un système photovoltaïque incluant un système de stockage d'énergie ». PFE,2015.
- [15] LOUAILECHE Chahla, LOUAILECHE Chahla, « Etude d'un système de pompage photovoltaïque avec stockage », PFE, 2018.
- [16] mtaterre. Le 14 avril 2023.
<https://mtaterre.fr/dossiers/comment-ca-marche-lenergie-solaire/lenergie-solaire-photovoltaique-pour-produire-de>
- [17] rygeen. Le 14 avril 2023.
<https://www.orygeen.eu/docs-actus/glossaire/panneau-photovoltaique/>
- [18] Younes SAHRI, « Contribution à la commande non linéaire et à la gestion d'énergie d'un système hybride d'énergies renouvelables ». Thèse doctorat.2022
- [19] M.R. Patel. « Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation ». Taylor & Francis Group, 2006.
- [20] GUIDE-PANNEAUX-PHTOVOLTAIQUE.BE. Le 16 avril 2023.
<https://www.guide-panneaux-photovoltaiques.be/technologies/le-panneau-monocristallin/>
- [21] GB SOLAR RDC ENGINEERING SERVICES. Le 18 avril 2023.
<https://www.gbsolar-es.cd/panneau-polycristallin300w-24v.html>

- [22] OhmEasy. Le 19 avril 2023.
<https://www.ohm-easy.com/blog/sources-alimentation/20140225-panneau-solaire-silicium-amorphe-meilleur-rendement/>
- [23] e⁺nergie. Le 19 avril 2023.
<https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaiques/>
- [24] CEREFÉ 2022
Dr. Abdelfettah MESRANE, Dr. Madjid CHIKH, Dr. Rabah SELLAMI, « GUIDE TECHNIQUE des installations solaires photovoltaïques autonome et Raccordées au réseau basse tension ». Edition 2022.
- [25] TOUMI Nihed, KOUDA Iskandar, « ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE ET SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE AUTONOME ». PFE,2021.
- [26] DS New Energy. Le 23 avril 2023.
<https://www.dsnsolar.com/info/introduction-to-hybrid-solar-system-36644389.html>
- [27] Madiha KENOUCHE, Yousra AMMOUR, « Conception et réalisation d'un régulateur de charge par panneaux photovoltaïques ». PFE,2019.
- [28] B. O, Mémoire de Master, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système Photovoltaïque, » Université de Ouargla, Ouargla, Algérie, 2011.
<http://www.univ-bejaia.dz/xmlui/handle/123456789/14614>
- [29] Mr Roger MARTIN, Mr Bernard DAVAT, « Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs », thèse doctorat 2011.
- [30] Mazouz Karim, « etude d'une batterie de stockage dans un système photovoltaïque », PFE,2012.
<http://univ-bejaia.dz/dspace/123456789/21290>

- [31] A. H. Fathima, K. Palanisamy. « Renewable systems and energy storages for hybrid systems. Hybrid-Renewable Energy Systems in Microgrids, Integration, Developments and Control ». 2018, Chapitre 8, 147-164
- [32] Germain SALVATO Vallverdu. « Principe de fonctionnement des batteries au lithium », 30 janvier 2020.
- [33] Z. Huang, A. Mu, L. Wu, H. Wang. « Vanadium redox flow batteries : Flow field design and flow rate optimization. Journal of Energy Storage ». 2022, 45, 103526.
- [34] Théorie. In seatronic. ENERGIE & informatique.
<http://blog.seatronic.fr/fiches-pratiques/energie/stockage/batterie/theorie/>
- [35] Patrick ABATI, Batterie d'accumulateur au plomb, 2009.
<https://sitelec.org/cours/abati/accu/accu.htm>
- [36] F. Naseri, S. Karimi, E. Farjah, E. Schaltz. Supercapacitor management system : A comprehensive review of modeling, estimation, balancing, and protections techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022, 155, 111913
- [37] R.Saisset, «Contribution à l'étude systématique de dispositifs énergétique à composants électrochimique. Formalise bond graph appliquée aux piles à combustible, accumulateurs lithium-ion », Thèse de Doctorat, Institut Nationale polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [38] Bourad Kahina. « Dimensionnement d'un système photovoltaïque avec stockage », Université de béjaia, Mémoire de Fin d'Etudes, année 2021.
<http://hdl.handle.net/123456789/17740>
- [39] M. Rafik BELABED, « Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque ». PFE, 2017.
- [40] L.A. Garcia-Gutiérrez. Développement d'un Contrôle Actif Tolérant aux Défaillances

- Appliqué aux Systèmes PV. Thèse de Doctorat. Cotutelle internationale : Université Toulouse 3 Paul Sabatier et Universidad de Los Andes
- [41] L.A. Garcia-Gutiérrez. « Développement d'un Contrôle Actif Tolérant aux Défaillances Appliqué aux Systèmes PV ». Thèse de Doctorat. Cotutelle internationale : Université Toulouse 3 Paul Sabatier et Universidad de Los Andes.
- [42] Ahmed MOHAMMEDI, « Contrôle par MPPT des systèmes de pompage Photovoltaïque ». Thèse de doctorat, Université de Bejaia, Algérie, 2015.
- [43] AURES SOLAIRE. Le 08 mai 2023.
<https://www.ares-solaire.com/>
- [44] Mme HAMOUCHE Née SERIR Chafiaa, « Commande D'un Système Multi-Sources Photovoltaïque/Eolien Associé à un système de stockage », Pour l'obtention du grade de DOCTEUR EN SCIENCES, 2016.
- [45] Nedjma Aouchiche. « Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque ». Université Bourgogne Franche-Comté, 2020. Français. NNT : 2020UBFCA001. Tel-02902953
- [46] A. OULD MOHAMED YAHYA, A. OULD MOHAMED YAHYA et I. YOUM, « Modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV /éolien/diesel) ». Revue des énergies renouvelables vol. 10 N°2 (2007) 205-214.
- [47] OUCHENE NASSIM, IDIR FARID, « Étude et réalisation d'un système photovoltaïque avec stockage ». PFE, 2019.
- [48] Katia TADJINE, « ETUDE ET SUPERVISION D'UN SYSTEME MULTI-SOURCES PHOTOVOLTAÏQUE–EOLIEN APPLICATION AU POMPAGE DE L'EAU ». Thèse de doctorat, Bejaia, Algérie, 2022.
- [49] BENAKLI Faiçal, BEKTACHE Hakim. « Etude Comparative des Méthodes de Maximisation de Puissance dans un Système Photovoltaïque », université de Bejaia, Promotion Juin2015.

- [50] Pierre Petit. « Optimisation du transfert d'énergie dans les systèmes photovoltaïques ». Université Paul Verlaine - Metz, 2011. Français. NNT : 2011METZ048Sff. Tel-« 01749187 ».
- [51] Othman AM, El-arini MMM, Ghitas A, Fathy A. « Realworld maximum power point tracking simulation of PV system based on Fuzzy Logic control ». NRIAG J Astron Geophys 2012.
- [52] Tounsia BEN KHEMMOU, « Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque intégrée au bâtiment : Cas d'un laboratoire au CDER », MASTER ACADEMIQUE en Génie Electrique, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2014.
- [53] Clarence Semassou, « Aide à la décision pour le choix de sites et systèmes énergétique adaptes aux besoins de bénin », Thèse doctorat en Mécanique, L'Université Bordeaux I Ecole doctorale : Sciences Physiques pour l'Ingénieur (SPI), 2011.
- [54] Florence Mattera, « Le stockage de l'énergie des systèmes photovoltaïques », l'actualité chimique - février-mars 2009 - n° 327-328.
- [55] Michael Boxwell, Greenstream Publishing, Solar Electric Handbook : « photovoltaic fundamentals and applications », 2016.
- [56] SOLAR OFF-GRIDE.COM Le 11 mai 2023.
<http://www.solaire-offgrid.com/le-solaire-et-ses-applications/architectures-solaire-photovoltaique/>
- [57] DJEDDI Karim, KADI Tarik, « Dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome pour une habitation », Université de Bejaia, PFE 2019.
- [58] Pierre VANGELUWE « Solaire photovoltaïque » Power green- solaire développement durable, Génie électrique, 2005.
- [59] Belkhir Yanis, Babahamed Khadidja. « Etude et faisabilité d'une installation photovoltaïque pour une mosquée ». Université de Bejaia, PFE 2020.

- [60] GuidEnR Photovoltaïque : « informations et actualités ».
- [61] Mark Hankins, James Shepherd « Off-Grid photovoltaic systems – Design and installation », publié par Routledge en 2016.
- [62] Ghedeir Brahim Dhif, Sayah Lembarek Mouadh, « Gestion d'énergie d'un système photovoltaïque », Master professionnel en Electronique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2018
- [63] e-LEE/. Le 16 mai 2023.
https://sites.uclouvain.be/elee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/Dimensionnement/DefinitionModules/definition_3.htm
- [64] GOOGLE maps
<https://www.google.com/maps/place/36%C2%B039'01.9%22N+4%C2%B044'07.2%22E/@36.6505666,4.7331276,17.25z/data=!4m4!3m3!8m2!3d36.650517!4d4.735338?entry=ttu>
- [65] RAGGIE. Le 29 mai 2023.
<https://www.raggiopower.com/uploadfiles/2019/03/201903021036273627.pdf>
- [66] ZAUCHE Faïka, « Maximisation de puissance des systèmes photovoltaïques ». En Vue de l'obtention du diplôme de doctorat, 20 octobre 2018.