



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Abderrahmane Mira –Bejaia-

Département électrotechnique

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

HAMITOUCHE SARA

En vue d'obtention du diplôme de Master Energies Renouvelables

Option: Energies Renouvelables en Electrotechnique.

Intitulé :

**ALIMENTATION D'UNE STRUCTURE PAR UNE
CONVERSION D'ENERGIE AUTONOME EN
COLLABORATION AVEC (EIRCET-BOUIRA)**

Soutenue le 03/06/2019

Devant le jury composé de :

Mr R.ALKAMA

Président

Mme R.ABDELI

Examineur

Mme CH.SERIR

Encadreur

Année d'étude 2018/2019

REMERCIEMENTS

En guise de reconnaissance, je tiens à témoigner mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribués de près ou de loin à l'aboutissement et à l'élaboration de ce modeste travail.

*Mes sincères gratitudes à **Mme. Chafia SERIR**, pour la qualité de son enseignement, sa disponibilité, ses conseils et son intérêt incontestable qu'il a porté à tous mes efforts.*

*Je tiens à remercier l'ensemble du corps professoral et du personnel de l'entreprise EIRCET en particulier **M. BACHA** et **M. MOUHMDI** pour leurs patiences, leurs conseils pleins de sens et pour le suivi et l'intérêt qu'ils ont portaient à mes travaux.*

*Je remercie profondément **M. BOUDISSA** enseignants à l'université de Bejaia pour son aide constante et bénéfique tout au long de mon parcours universitaire, sans oublier **M. ADLI**, pour tout le temps qui nous a consacré.*

Je tiens aussi à présenter mes remerciements les plus intenses à mes proches :
Ma mère, dont le dévouement pour moi est sans limite ;
Mon père qui ; sans lui ; ce parcours ne m'aurais jamais été réel.
Mes soeurs Tita, Touma, Yasmine et Ghaya ainsi que mon frère Madani pour leurs soutien mes beaux-frères Islem et Nabil ma cousine Rabima ;
A Kiki et sa famille d'avoir cru en moi ;
A mes ami (es) Ferial, Betitra, Idriss, Kiki, Didine, Farinas;
Mes camarades de la promotion Electrotechnique et énergies renouvelables.

Il m'est impossible de leurs exprimer avec envergure toute ma reconnaissance en quelques lignes, mais je tiens tout de même à les remercier chaleureusement et leurs assurer toute ma gratitude. Leurs encouragements et leurs soutiens resteront à jamais dans ma mémoire.

HAMITOUCHE Sara

Nomenclature

Symboles

Symboles	Description	Grandeur
V_{co}	Tension à vide	V
I_{cc}	Courant de court-circuit.	A
V_{MPP}	Tension au point de puissance maximal	V
I_{MPP}, I_m	Intensité au point de puissance maximal	A
V_{opt}	Tension optimal	V
I_{opt}	Intensité optimal	A
S	Section du câble.	mm ²
P	Résistivité du matériau $1.851 \times 10^{-8} \Omega \cdot m = 0.0185 \Omega \cdot mm^2/m$.	SI
E	Chute de tension	%
I	Courant admissible dans le câble.	A
L	Longueur du câble	m
I_{max}	Intensité maximale du PV	A
I_{cc}	Courant du court-circuit du PV.	A
N_{pv}	Nombre de PV.	/
V_{batt}	Tension de la batterie	V
$V_{batt,u}$	Tension de la batterie unitaire	V
$N_{batt,s}$	Nombre de batterie en série	/
V_{pv}	Tension du PV	V
I_{batt}	Courant de la batterie	A
I_B	Courant maximal d'emploi.	A
P_{ch}	Puissance de charge	W
$\cos \varphi$	Déphasage 0.86.	/
V_N	Tension nominale.	V
B	Un coefficient égal à 1 en triphasé et à 2 en monophasé.	/
L_n	Longueurs de diffusion des électrons	
L_p	Longueurs de diffusion des trous	
Q	Charge élémentaire ($1.6 \cdot 10^{-19} C$)	C
G	Quantité des paires électron-trou	
V_{op}	Tension en circuit ouvert	V
V_{oc}	Tension du circuit ouvert	V
V_{th}	Tension thermique.	V
I_s	Courant de saturation de la diode	A
K	Constante de Boltzmann $1.38 \cdot 10^{-23} (J/K)$.	SI
A	Coefficient d'idéalité de la cellule.	/
V_m	Tension de point de puissance maximale	V
I_m	Courant de point de puissance maximale	A
P_m	Point de puissance maximale	W
P_{in}	Puissance du flux lumineux incident	W
E	L'ensoleillement	W/m ²

S	Surface effective des cellules.	m ²
T _J	Température de la jonction	°C
T _a	Température ambiante.	°C
NOCT	Température nominale de fonctionnement de la cellule	°C
η	Rendement de conversion d'énergie	%
P _{max}	Puissance maximale	W
R _s	Résistance interne de la cellule	Ω
R _p	Résistance parallèle	Ω
I _{pv}	Courant délivré par le module.	A
I _{ph}	Photo courant.	A
I _D	Courant de diode.	A
I _P	Courant shunt	A
E _{sref}	L'éclairement sous condition STC	W/m ²
T _{Jref}	Température sous condition STC	°C
P ₁ , P ₂ , P ₃ , P ₄ , P ₅	Paramètres constants	/
I _{od}	Courant de saturation de la diode	A
N _s	Nombre totale de cellules connectées en séries et /ou en parallèles.	/
E _g	Énergie de gap	/
K ₁ , K ₂ , K ₃ , K ₄	Paramètres constants	/
m	Paramètre constant	/
ΔT _c	Variation de la température.	°C
ΔI _{pv}	Variation du courant par rapport à l'insolation et à la température.	A
ΔV _{pv}	Variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température	V
α _{cc}	Coefficient de température d'incrémentement du courant I _{cc}	/
β _{oc}	Coefficient de température, d'incrémentement de la tension V _{oc}	/
ΔI	Variation de courant	A
α _{ref}	Coefficient référence de température d'incrémentement du courant	/
β _{ref}	Coefficient référence de température d'incrémentement de la tension	/
C ₁ , C ₂	Paramètre constant	/
I _{ph}	Courant photonique de la diode	A
I _p	Intensité parallèle	A
I _{d1}	Courant de la diode 1	A
I _{d2}	Courant de la diode 2	A
I _{s1} , I _{s2}	Courants de saturation des diodes	A
P _n	Puissance nominale	W
V _{ch}	Tension de charge	V
I _{ch}	Courant de charge	A
α	Rapport cyclique	/
V _{dc}	Tension d'entrée de l'onduleur	V
V _{ab} , V _{bc} , V _{ca}	Tensions composées	V
V _{ao} , V _{bo} , V _{co} ,	Tensions à l'entrée de l'onduleur	V
V _{an} , V _{bn} , V _{cn}	Tensions de phase de la charge	V
V _{no}	Tension du neutre de la charge	V
S ₁ , S ₂ , S ₃	Fonctions logiques	/

I_a, I_b, I_c	Courant au point a,b,c respectivement	A
V_G	Tension du générateur	V
I_G	Courant du générateur	A
R_L	Résistance interne de la bobine	Ω
i_L	Courant de la bobine L	A
i_C	Courant du condensateur	A
I_{ond}	Courant de l'onduleur	A
C	Capacité du condensateur	F
P_{batt}	Puissance de la batterie	W
C_{batt}	Capacité de la batterie	F
Q_d	Quantité de charge manquante par rapport à C_{batt}	C
E_b	Force électromotrice	
R_b	Résistance interne	Ω
V_{batt-d}	Tension en décharge	V
V_{batt-c}	Tension de charge	V
R_d	Résistance de la batterie pendant la décharge	Ω
R_c	Résistance de la batterie pendant la charge	Ω
K_v	Facteur de tension	/
B_j	Besoin journalier	kWh/j
φ	L'altitude	°
	L'inclinaison	°
P_{Gpv}	Puissance crête du panneau choisi.	W
G_s	Valeur de l'ensoleillement moyenne annuelle.	Wh/m ² .j
N_e	Nombre d'heure équivalent.	h
P_{pv}	Puissance crête unitaire.	W
V_{Gpv}	Tension de GPV	V
$V_{pv,u}$	Tension nominale unitaire.	V
N_p	Nombre de PV parallèle	/
N_s	Nombre de PV en série	/
N_T	Nombre totale de panneaux	/
S_{Tot}	Surface totale	m ²
$S_{pv,u}$	Surface d'un panneau.	m ²
η_{batt}	Rendement de la batterie 95%.	%
DOD	Taux de charge de la batterie	%
$C_{batt,u}$	Capacité de la batterie unitaire	A/h
$N_{batt,p}$	Nombre de batterie en parallèle	/
N_{batt}	Nombre de batterie	/
$P_{c,est}$	Puissance crête estimer	W
$P_{ond,est}$	Puissance de l'onduleur estimer	W

Abréviation

Abréviation	Signification
PV	Panneau photovoltaïque
MPP, PPM	Point de puissance maximal
DC	Courant continue
AC	Courant alternatif
L	L'inductance
S	Commutateur
D	Diode
C	Condensateur
R	Charge
FLS	Fuzzy logic contrôle
P&O	Perturbation et observation
FF	Facteur de forme
BT	Basse tension
UTE	Commission de l'Union Technique de l'Electricité
GPV	Générateur photovoltaïque
HT	Haute tension
Jaut	Nombre de jour d'autonomes jours.
EDC	Etat de charge de la batterie

Liste des tableaux :

❖ Chapitre II :

Tableaux	Titre	Page
Tableau II-1	Paramètres obtenus du modèle à une diode du panneau PV SM110	28
Tableau II-2	Paramètres électriques du panneau SIEMENS.	28

❖ Chapitre III :

Tableaux	Titre	Page
Tableau III-1	Bilan énergétique de l'immeuble	49
Tableau III-2	Choix de l'inclinaison.	50
Tableau III-3	Dimensionnement du GPV	56
Tableau III-4	Dimensionnement du sous générateur PV	57
Tableau III-5	Bilan énergétique de l'immeuble pendant la nuit	57
Tableau III-6	Dimensionnement du système de stockage	58
Tableau III-7	Dimensionnement de l'onduleur	58

Liste des figures :

❖ Chapitre I :

Figures	Titre	Page
Figure I-1	La sphère céleste	05
Figure I-2	Les coordonnées solaires d'une structure	06
Figure I-3	Composant du rayonnement solaire	07
Figure I-4	L'insolation annuelle moyenne en Algérie	08
Figure I-5	Cellule photovoltaïque monocristalline	09
Figure I-6	Cellule photovoltaïque polycristallines	10
Figure I-7	Cellule photovoltaïque couche mince	10
Figure I-8	Schéma d'une cellule PV en silicium	11
Figure I-9	Caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$	12
Figure I-10	Cellules identiques en série	13
Figure I-11	Cellules identiques en parallèle	13
Figure I-12	Schématisme d'un GPV avec diodes by-pass et diode anti-retour	14
Figure I-13	Schéma électrique équivalent d'un hacheur série	17
Figure I-14	Schéma électrique équivalent d'un hacheur parallèle	17
Figure I-15	Schéma électrique équivalent d'un hacheur Buck-Boost	18

❖ Chapitre II :

Figures	Titre	Page
Figure II-1	Système globale a étudié	21
Figure II-2	Schéma équivalent d'une cellule PV modèle a une diode	22
Figure II-3	Schéma équivalent d'une cellule PV modèle a deux diodes.	27
Figure II-4	Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$.	29
Figure II-5	Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$	29
Figure II-6	Influence de l'irradiation sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$.	30
Figure II-7	Influence de l'irradiation sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$.	30
Figure II-8	Hacheur survolteur	31
Figure II-9	Circuit électrique de l'onduleur	32
Figure II-10	Hacheur Buck-Boost	33
Figure II-11	Modèle du bus continu	34
Figure II-12	Schéma équivalent du modèle CIEMAT	35
Figure II-13	Influence de la température sur la capacité.	37
Figure II-14	Influence de la température sur l'état de charge de la batterie.	37
Figure II-15	Organigramme de la méthode perturbation et observation (P&O)	39
Figure II-16	Caractéristiques d'un panneau solaire (principe de fonctionnement de (P&O)).	40
Figure II-17	Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de dP/dV sur la caractéristique de la puissance	40
Figure II-18	Organigramme de la méthode conductance incrémentielle (CI).	41
Figure II-19	Influence de l'irradiation sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ avec et sans optimisation	43
Figure II-20	Allure de la tension du panneau photovoltaïque après l'application du la P&O.	44
Figure II-21	Allure du courant du panneau photovoltaïque après l'application du la P&O.	44
Figure II-21	Allure de la puissance du panneau photovoltaïque après l'application du la P&O.	45

❖ **Chapitre III :**

Figures	Titre	Page
Figure III-1	Organigramme de l'entreprise	46
Figure III-2	Situation géographique du projet 50 bureaux Tindouf	48
Figure III-2	L'irradiation solaire annuelle donnée pour la région de Tindouf (2019)	51
Figure III-3	La variation de la longueur du jour sur une année à la région de Tindouf (2019)	51
Figure III-4	La variation de température au court de l'année pour la région de Tindouf (2019)	52
Figure III-5	Diagramme de gestion d'un système PV avec batteries.	59
Figure III-6	Profile de charge.	60
Figure III-7	Profile d'irradiation d'une journée dans la région de Tindouf.	60
Figure III-8	Tension de la batterie.	61
Figure III-9	Etat de charge de la batterie.	61
Figure III-10	Tension du bus continu à la sortie du redresseur	62
Figure III-11	Allure des puissances (photovoltaïque, batteries et charge) après la gestion	62
Figure III-12	Modes de fonctionnement.	63

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I

I.1	Introduction.....	3
I.2	Types d'énergies renouvelables	3
I.3	Géométrie terre-soleil.....	4
I.3.1	La sphère céleste	4
I.3.2	Les coordonnées géographiques	5
I.3.3	L'orientation et l'ensoleillement.....	6
I.4	L'énergie solaire.....	7
I.4.1	Rayonnement solaire	7
I.5	L'énergie solaire photovoltaïque.....	8
I.5.1	La cellule photovoltaïque	8
I.5.2	Types de cellules PV	9
I.5.3	Effet photovoltaïque	11
I.5.4	Caractéristique d'une cellule PV à base de silicium	11
I.5.5	Panneau photovoltaïque.....	12
I.5.6	Protection des cellules PV	13
I.6	Type de système photovoltaïque	14
I.6.1	Système connecté au réseau.....	14
I.6.2	Système autonome.....	14
I.6.3	Système hybride	15
I.7	Le stockage d'énergie électrique.....	15
I.7.1	Constitution d'une batterie solaire plomb-acide	16
I.7.2	Caractéristiques principales d'une batterie	16
I.8	Convertisseurs statique	16
I.8.1	Convertisseur DC/DC (hacheur).....	17
I.8.2	Convertisseur DC/AC (onduleur).....	18
I.9	Boîtes de jonction.....	18
I.10	Mise à la terre.....	18
I.11	Normes concernant les installations photovoltaïques	19

Sommaire

I.12	La gestion d'énergie photovoltaïque	19
I.13	Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques	19
I.13.1	Les avantages	19
I.13.2	Les inconvénients	20
I.14	Conclusion	20

Chapitre II

II.1	Introduction	21
II.2	Modélisation du générateur PV.....	21
II.2.1	Le modèle d'une cellule photovoltaïque	22
II.2.2	Les modèles mathématique	23
II.2.3	Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du panneau photovoltaïque	28
II.3	Modélisation des convertisseurs statiques.....	30
II.3.1	Modélisation du hacheur élévateur de tension (Boost)	30
II.3.2	Modélisation de l'onduleur	31
II.3.3	Modélisation du hacheur Buck-Boost	33
II.4	Modélisation du filtre	34
II.5	Modélisation de la batterie	34
II.5.1	Simulation de la batterie modèle CIEMAT.....	37
II.6	Optimisation du générateur photovoltaïque	38
II.6.1	La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking). 38	
II.6.2	Applications et simulations de la méthode P&O sur un panneau photovoltaïque	43
II.7	Conclusion.....	45

Chapitre III

III.1	Introduction.....	46
III.2	Présentation de l'entreprise d'accueil.....	46
III.3	Présentation du projet à étudier.....	47
III.4	Bilan énergétique de l'immeuble	48
III.5	Orientation et inclinaison des panneaux solaire.....	49
III.6	Les caractéristiques météorologique de Tindouf	50
III.6.1	L'irradiation solaire	50

Sommaire

III.6.2	Longueur du jour.....	51
III.6.3	Les températures	52
III.7	Dimensionnement du système d'alimentation à base d'énergie photovoltaïque	52
III.7.1	Le générateur photovoltaïque	52
III.7.2	Dimensionnement des batteries	54
III.7.3	Dimensionnement de l'onduleur	54
III.7.4	Dimensionnement du câblage	55
III.7.5	Application numérique	56
III.8	Gestion du système de production d'énergie	58
III.9	Simulation du système globale	60
III.10	Etude d'impact environnement	63
III.11	Conclusion	64
	Conclusion générale	65

Introduction générale

Le besoin énergétique d'il y a 20 ans n'est plus le même avec celui d'aujourd'hui. Un accroissement gigantesque de ce besoin impose la nécessité d'évolution des systèmes de productions. Hélas ; puisque nos systèmes actuels énergétiques sont essentiellement des technologies mécaniques trop polluantes, alors cette ancienne conception, induit des dommages colossaux envers l'écosystème de notre planète.

Les émissions des gaz à effet de serre (CO₂, NO₂, CH₄...etc.) générés abondamment par nos centrales à énergie fossiles, sont pleinement injectées dans l'atmosphère. Ceci, constitue par la suite une matière gazeuse dangereuse qui empêche la grande majorité des infrarouges provoqués par énergie solaire de s'échapper vers l'espace. Autrement dit, la chaleur qui doit être évacuée de notre planète, y reste emprisonnée, et le crime dans tout ça n'est autre que le fameux réchauffement climatique [2].

Pour lutter contre ce phénomène, la proposition des énergies renouvelables offre de bonnes solutions, puisqu'elles ne contiennent aucunement de rejets polluants. Eolienne, solaire photovoltaïque ou thermique, marine, hydraulique, biomasse et bien d'autres formes que nous pouvons citer dans ce créneau énergétique ; évoquent théoriquement des espoirs indiscutables, mais pratiquement, ceci n'est pas si attractif. Les blêmes avec ces énergies, sont d'ordre de fiabilité, disponibilité, durée de vie, productivité et même d'ordre financier. Elles présentent toute des inconvénients qui affaiblissent l'engagement des industriels ou des états dans le sens de leur développement.

Dans le cadre de promouvoir encore plus cette alternative, beaucoup d'études doivent être mis en œuvre pour repousser ces limites et donner à cette solution plus d'élans et d'évolution. Ce présent manuel consiste l'une de ces investigations et porte l'objectif de faire une étude de dimensionnement d'une "*Alimentation d'une structure par un système de conversion d'énergie autonome*". Elle a été réalisé en collaboration avec le staff d'études de l'entreprise EIRCET-ETS BMA qui est spécialisée dans la réalisation des infrastructure électriques et télécoms.

Ce mémoire comporte l'essentielle du projet de dimensionnement d'une installation de production à base d'énergie électrique photovoltaïque pour l'approvisionnement d'un édifice à forte demande d'électricité appartenant au siège de la wilaya de Tindouf. Notre approche est répartie en trois parties distinctes. Au début nous avons tenté d'énumérer quelques données théoriques et phénoménologiques relatives aux énergies renouvelables pour avoir un aperçu sur les solutions que nous rapporte cette solution énergétique en particulier le cas solaire photovoltaïque. Ensuite, nous avons présenté de manière générale les différentes constituantes d'un système de conversion solaire photovoltaïque autonome et leurs modélisations numériques respectives, dans l'objectif de construire un programme de simulation sous l'environnement du logiciel Matlab-Simulink pour avoir les caractéristiques optimisées du système selon les variations météorologiques. La dernière partie constitue la partie pratique de ce travail dans laquelle nous avons réuni les informations nécessaires à nos calculs et nous

Introduction générale

avons lancé une procédure de dimensionnement d'une mini centrale solaire photovoltaïque pour l'alimentation d'un édifice administratif complémentaire au siège de la wilaya de Tindouf.

I.1 Introduction

Actuellement, la demande mondiale en énergie électrique augmente de 2% par an. Que ce soit pour, le secteur privé, industriel ou pour un simple citoyen, la disponibilité de cette énergie, sans coupure, fiable et par abondance est devenu plus que nécessaire pour parer à maintes obligations de la vie. Hélas, dans nos jours, 90% d'énergie électrique qu'on consomme provienne de sources fossiles et ces dernières engendrent fatalement une dégradation à échelle climatique par émanation de gaz à effet de serre. Pour renoncer à cette destruction de l'environnement, il est essentiel de prévoir d'autres ressources qui écologiquement, répondent à la notion du développement durable donnée dans le rapport Brundtland en 1987, « *Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs* », et ce en mettant en avant les énergies renouvelables.

On dit sur une énergie qu'elle est renouvelable lorsque la source qui l'a fourni est à la fois naturelle et son renouvellement est inépuisable. Le vent, le soleil, la chaleur terrestre, les chutes d'eau, les marées ou aussi la végétation sont des sources renouvelables que grâce aux différentes technologies conçues pour l'exploitation et la conversion d'énergie, il est aujourd'hui possible d'avoir une électricité propre qui lutte contre la propagation de ces rejets, directement injectés dans l'atmosphère, qui s'avère être très nuisible pour la vie humaine, la faune et la flore.

Le rayonnement solaire constitue une source d'énergie gratuite, abondante et renouvelable, non polluante et inépuisable, l'énergie solaire permet de respecter l'environnement et de préserver les ressources énergétiques, sans produire de déchets ni d'émissions impropres. À l'aide de semi-conducteurs photosensibles comme le silicium et le CdTe, on peut aujourd'hui capter et convertir directement ou indirectement les rayonnements solaires en énergie électrique. Et évidemment, exploiter ce gisement énergétique peut se faire sur diverses quantités que ce soit pour quelques KW, des MW ou encore des GW.

Notre travail consiste à faire une étude globale pour un système d'alimentation électrique en énergie photovoltaïque. Pour ce faire, nous allons définir les différents paramètres que nous devons prendre en compte pour mettre en place une installation qui répond aux exigences du client et aux consignes données par les guides universels de la conformité des installations électriques et photovoltaïques.

I.2 Types d'énergies renouvelables

Différentes techniques ont été élaborées pour pouvoir extraire de l'énergie des phénomènes et des éléments naturels. Parmi les énergies les plus utilisées on a [1] :

- **L'énergie éolienne** : Cette énergie, utilise la force du vent. Son principe est de transformer dans un premier cas l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis dans un second cas par l'intermédiaire d'un générateur l'énergie mécanique en énergie électrique.

- **L'énergie hydraulique** : C'est une technique très ancienne qui permet de stocker des masses importantes d'eau que l'on transforme ensuite en électricité. On la nomme aussi hydroélectricité. Celle-ci peut être produite par des centrales hydrauliques alimentées en partie par des barrages.
- **L'énergie géothermique** : Des centrales géothermiques se servent de la chaleur dégagée par le noyau terrestre. L'avantage de cette énergie est qu'elle ne dépend pas des conditions climatiques ni des saisons.

L'énergie géothermique se présente sous deux formes :

- Basse température pour chauffer les habitations des particuliers,
- Haute température, dans ce cas, c'est un moyen de produire de l'électricité.

- **L'énergie biomasse** : Cette énergie concerne le bois, les résidus forestiers, les déchets organiques et verts ainsi que le biocarburant ou essence verte.

Cette essence verte est classée en deux types :

- **Ethanol** issu du blé, maïs, betterave, canne à sucre.
- **Biodiesel** issu du colza, tournesol, soja.

Ces biocarburants sont souvent mélangés aux carburants classiques pour limiter les effets de serre. Le bois, quant à lui, est un combustible utilisé depuis la nuit des temps pour le chauffage et la cuisine.

- **L'énergie solaire** : L'énergie solaire provient, comme son nom l'indique, du soleil. Cette énergie peut être transformée utilement en chaleur (le thermique) ou en électricité (le photovoltaïque), On distingue alors deux types d'énergie solaire ; énergie solaire thermique et l'énergie solaire photovoltaïque.

I.3 Géométrie terre-soleil

I.3.1 La sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre considéré infini [3], ayant pour centre la planète terre. Cette sphère nous sert à positionner et à déterminer les intervalles du temps des objets qui se situent dans le ciel.

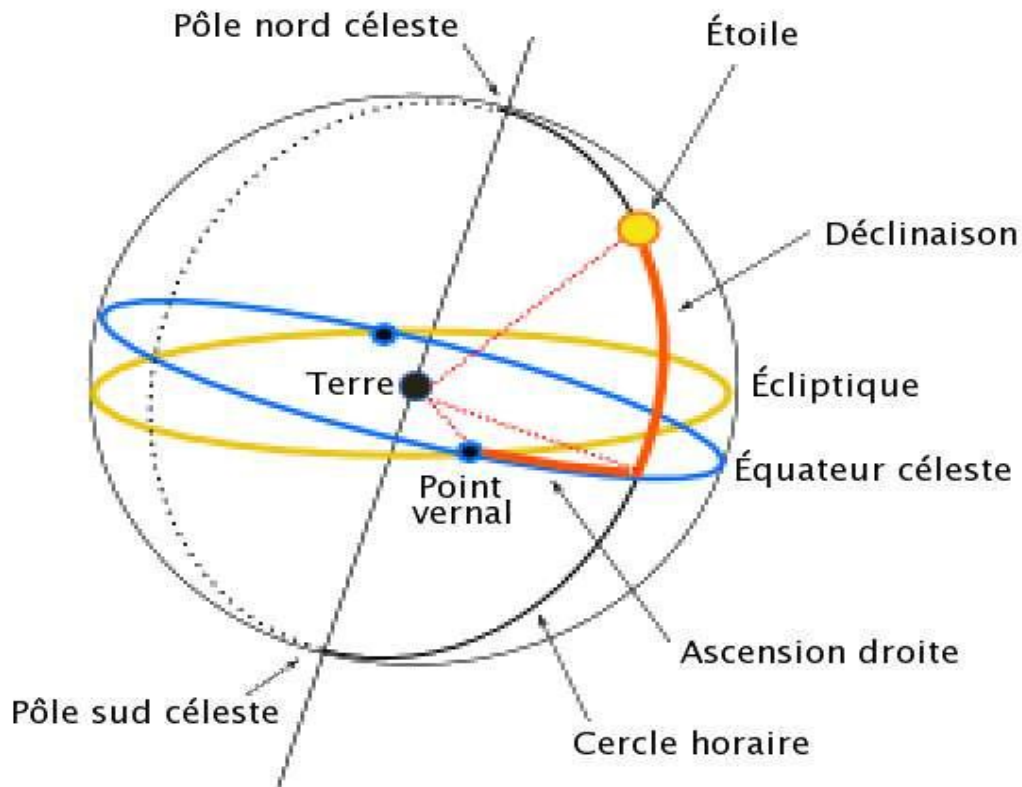


Figure I-1 : La sphère céleste (Source : Natation astronomique)

I.3.2 Les coordonnées géographiques

Ce sont des coordonnées angulaires qui nous permettent de déterminer l'emplacement de n'importe quel point sur terre, on distingue :

➤ **Longitude (L)**

La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens, l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich 0°) et l'autre déterminé par le lieu envisagé. Les lieux situés à l'Est sont comptés positivement avec le signe plus (+) et ceux situés à l'Ouest sont comptés négativement avec le signe moins (-). Longitude d'un lieu peut aussi être comprise entre -180° et $+180^\circ$, à tout écart de 1° de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps.

➤ **Latitude (φ)**

Elle correspond à la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elles varient de 0° (équateur) à $+90^\circ$ pour l'hémisphère nord et de 0° à -90° pour l'hémisphère sud.

➤ **Déclinaison (δ)**

L'angle de déclinaison correspond à l'angle que fait le soleil au maximum de sa course (midi solaire) par rapport au plan équatorial sa valeur en degré. Cet angle varie de -23.27° au

solstice d'hiver (22 décembre) à $+23.27^\circ$ au solstice d'été (22 juin) et il est nul aux équinoxes (21 mars et 23 septembre).

➤ **La hauteur angulaire du soleil (h)**

C'est l'angle entre le plan horizontal du lieu d'observation et la direction du soleil, elle est comptée positivement de 0° à $+90^\circ$ vers le Zénith et négativement de 0° à -90° vers le Nadir.

➤ **L'azimut (α)**

C'est l'angle entre la direction du soleil et la direction du sud, on peut le compter positivement de 0° à $+180^\circ$ vers l'Ouest et négativement de 0° à -180° vers l'Est.

➤ **Angle horaire du soleil et angle horaire du soleil à son coucher**

L'angle horaire solaire est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire, dans sa course d'est en ouest, par rapport au méridien local. La valeur de l'angle horaire est nulle au midi solaire, négative le matin, positive en après-midi et augmente de 15° par heure (un tour de 360° en 24h). Ainsi, à 7h :00 du matin (heure solaire), l'angle horaire du soleil vaut -75° (7h00 du matin est 5h avant midi ; cinq fois 15° égal 75° , avec un signe négatif pour signifier que c'est le matin) [4].

I.3.3 L'orientation et l'ensoleillement

L'ensoleillement est caractérisé par la trajectoire du soleil et sa durée. Les conditions géométriques entre le soleil et la terre déterminent la position relative du soleil qui est repéré par son azimut et sa hauteur angulaire. [5]

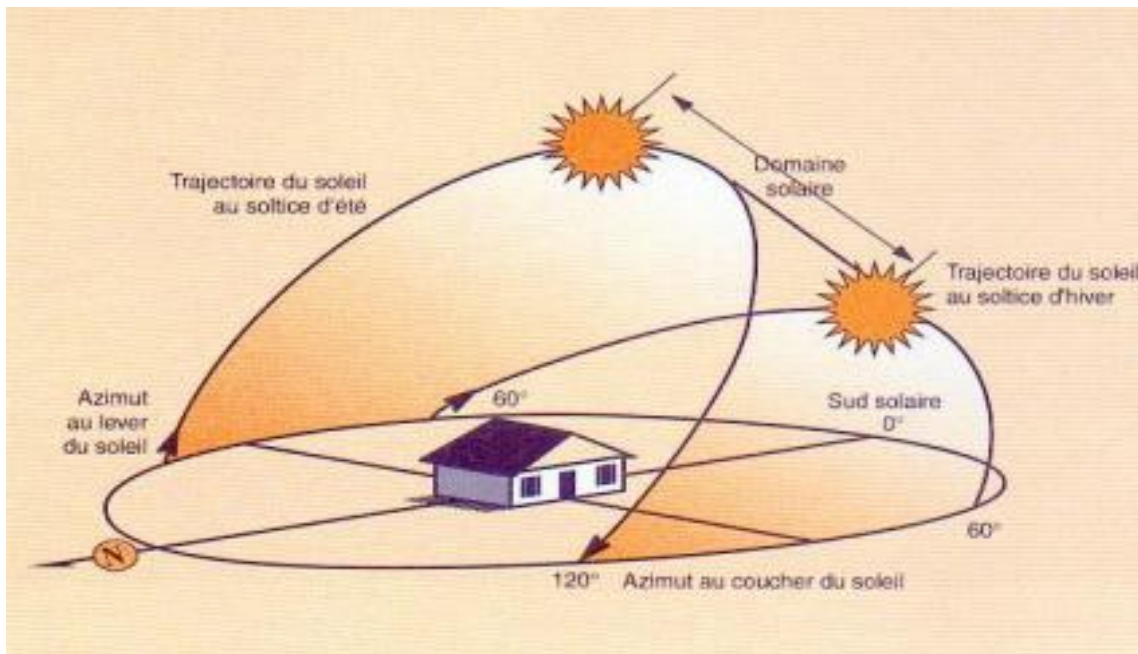


Figure I-2 : Les coordonnées solaires d'une structure [5]

I.4 L'énergie solaire

Désigne l'énergie récupérée et transformée en électricité à partir de la lumière ou de la chaleur du soleil par des panneaux photovoltaïques ou des panneaux thermiques. Cette électricité est produite soit la conversion directe d'un photon en électron au niveau d'un semi-conducteur ; soit par l'utilisation d'une vapeur issue d'un fluide supra-échauffé par un autre fluide, dit caloporteur, qui capte et transfère l'énergie thermique du rayonnement solaire.

I.4.1 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire signifie l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil [6]. Il se compose d'ultraviolets, de la lumière visible, d'ondes radio et des rayons cosmiques.

I.4.1.1 Les formes du rayonnement solaire

- **Le rayonnement solaire direct** : C'est le rayonnement reçu directement du soleil, sans diffusion.
- **Le rayonnement diffus** : Il est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, ...).
- **L'albédo** : C'est la partie réfléchi par le sol. Il est déterminé à l'aide d'un appareil albédo-mètre et dépend de l'environnement du site.
- **Le rayonnement solaire global** : C'est la somme des différents rayonnements, on le mesure avec un pyromètre.

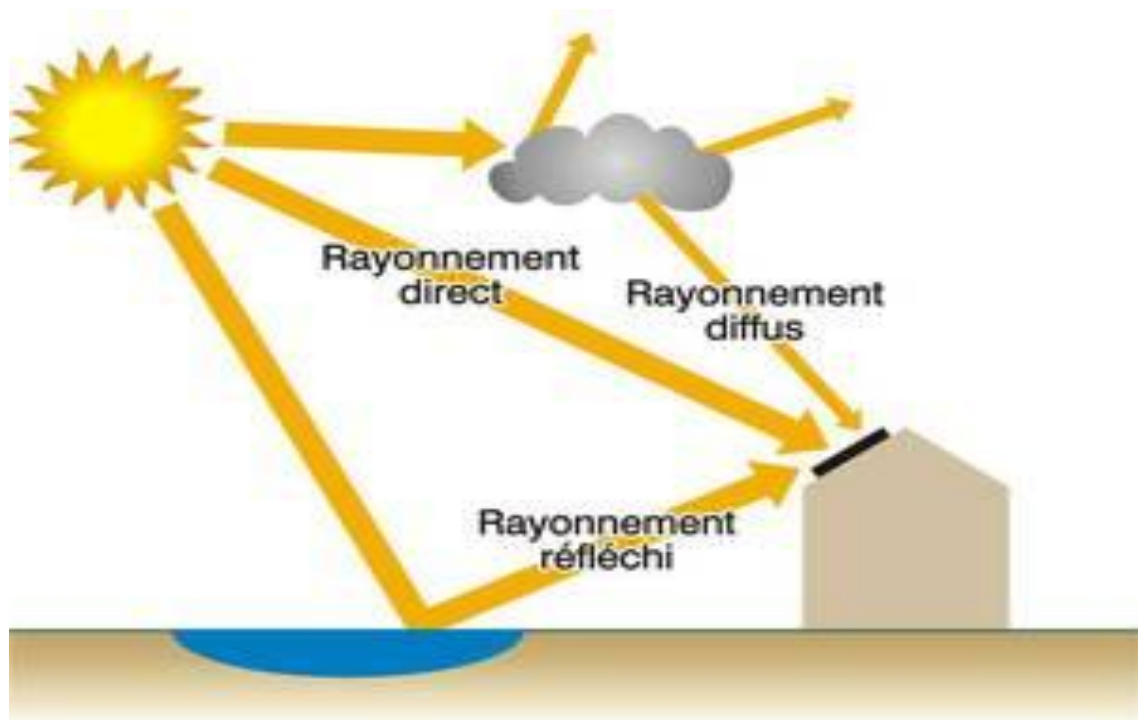


Figure I-3 : Composants du rayonnement solaire [8]

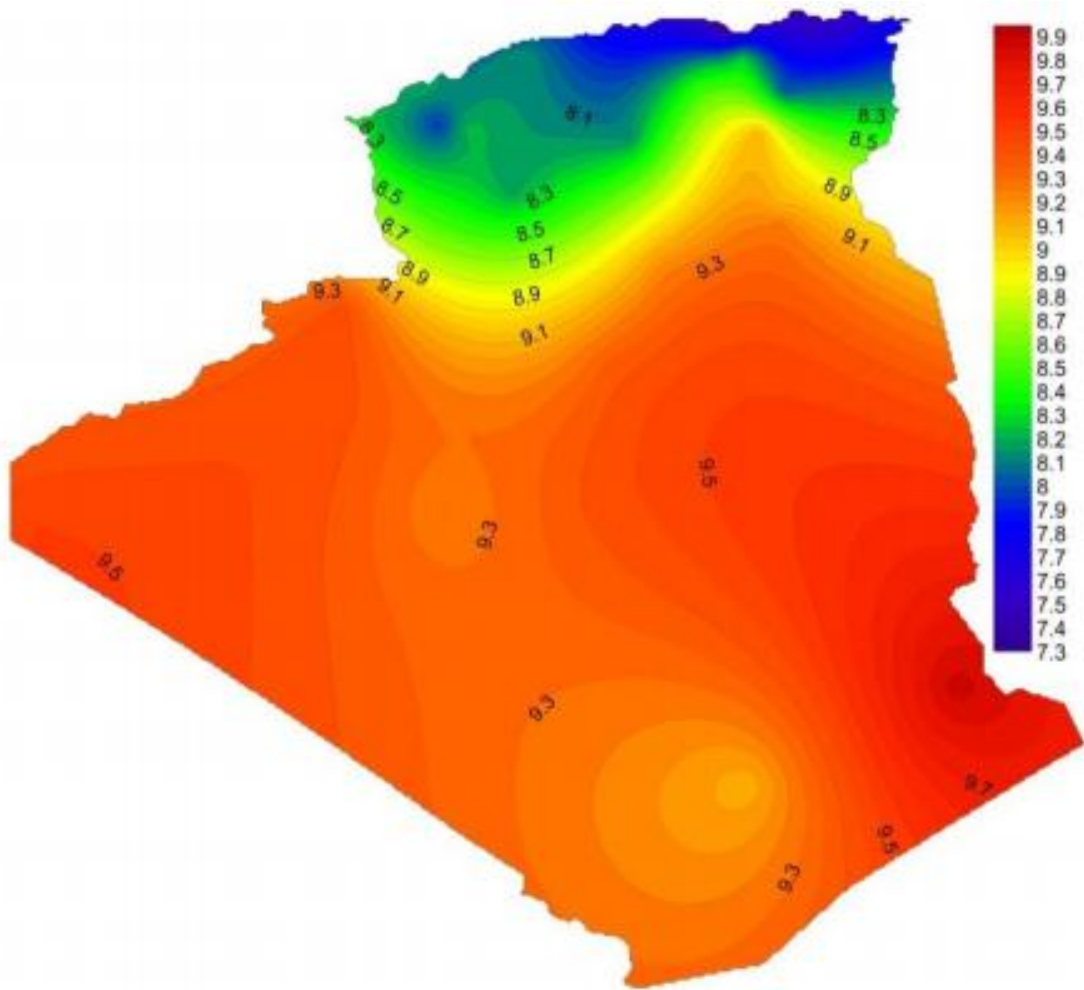


Figure I-4 : L'ensoleillement annuel moyen en Algérie (Heure 1983-2012) [7]

I.5 L'énergie solaire photovoltaïque

I.5.1 La cellule photovoltaïque

En électronique, une cellule photoélectrique ou une cellule photovoltaïque est un dispositif électrique / électronique qui convertit l'énergie incidente du rayonnement solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque [9].

Le champ électrique est généré à partir des polarisations respectives des deux zones de la cellule photovoltaïque. Généralement, la partie supérieure a un caractère négatif alors que la partie inférieure porte le positif afin de créer la jonction P-N. Cette dernière est le résultat de la mise en contact d'un semi-conducteur dopé N (donneur d'électron) et d'un autre semi-conducteur dopé P (donneur de trous). L'interface entre ces deux régions s'appelle une jonction.

Pour réaliser des cellules photovoltaïques, il existe trois configurations de jonctions :

- Une jonction P-N (homo jonction ; les deux régions sont constituées d'un même matériau semi-conducteur, du silicium dans la majorité des cas).

- Une hétérojonction (jonction entre deux semi-conducteurs différents).
- Une jonction métal-semi-conducteur

Dans ces trois configurations, les phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques sont similaires [10].

I.5.2 Types de cellules PV

Il existe différents types de cellules photoélectriques en fonction de la nature et des caractéristiques des matériaux utilisés. Le type le plus courant est la cellule de silicium cristallin (Si). Ce matériau est découpé en feuilles très minces en forme de disque, monocristallines ou poly-cristallines, en fonction du processus de fabrication de la barre de silicium [9].

I.5.2.1 Cellules monocristallines

Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal.

Un **wafer** (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de la surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs) le **wafer** devient cellule. [10]

Ces types de cellules solaires ont un bon rendement énergétique, et un bon ratio Wc/m^2 mais ils coûtent plus cher que les autres types. Pour cette raison, ils ont actuellement un niveau d'implémentation modéré.



Figure I-5: Cellule photovoltaïque monocristalline

I.5.2.2 Cellules poly-cristallines

Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure poly-cristalline [10].

Ce type de cellules a un rendement inférieur à celui des cellules monocristallines, mais présente actuellement une forte implantation car son coût économique est inférieur à celui du monocristallin.

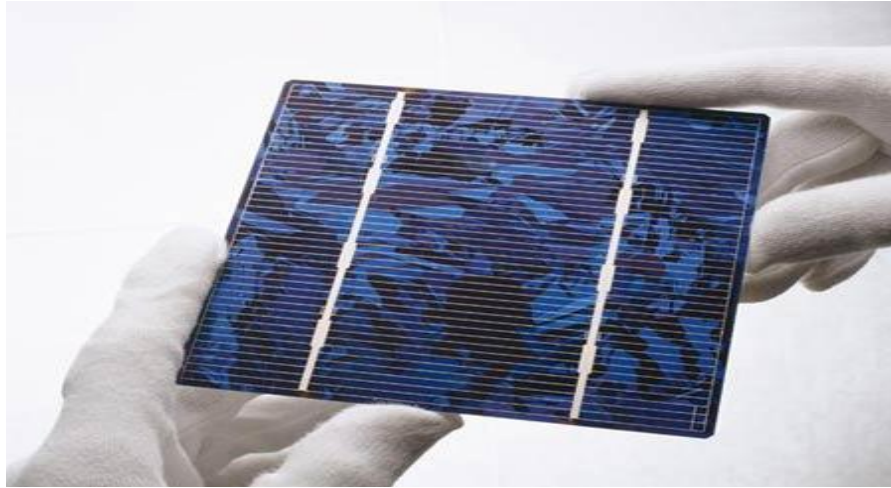


Figure I-6: Cellule photovoltaïque poly-cristallines

I.5.2.3 Cellules couches minces (Tandem)

Les cellules couches minces ne sont pas fabriquées avec des cellules individuelles, mais sous la forme de bandes continues dans lesquelles une couche mince de silicium amorphe (a-Si), est déposée sur un substrat approprié (verre ou résines synthétiques). Panneau continu qui n'a pas besoin d'interconnexions intérieures. Les cellules avec du silicium amorphe ont un rendement d'environ la moitié des cellules cristallines [9].



Figure I-7 : Cellule photovoltaïque couche mince (Tandem)

I.5.2.4 Cellule multi-jonction

Des cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces. Chaque type de semi-conducteur est caractérisé par une longueur d'onde maximale au-delà de laquelle il est incapable de convertir le photon en énergie électrique. De plus, l'excès d'énergie véhiculé par le photon est perdu. D'où l'intérêt de choisir des matériaux avec des longueurs aussi proches les unes des autres que possible de manière à ce qu'une majorité du spectre solaire soit absorbé, ce qui génère un maximum d'électricité à partir du flux solaire [11].

I.5.3 Effet photovoltaïque

La conversion de la lumière en électricité, appelée conversion photovoltaïque, se produit dans des matériaux semi-conducteurs. Le semi-conducteur le plus utilisé est disponible en très grande quantité sur terre : il s'agit du Silicium (Si). Le Silicium présent dans le sable sous forme de silice et de silicates.

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité. La conversion se fait par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présente un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P [9].

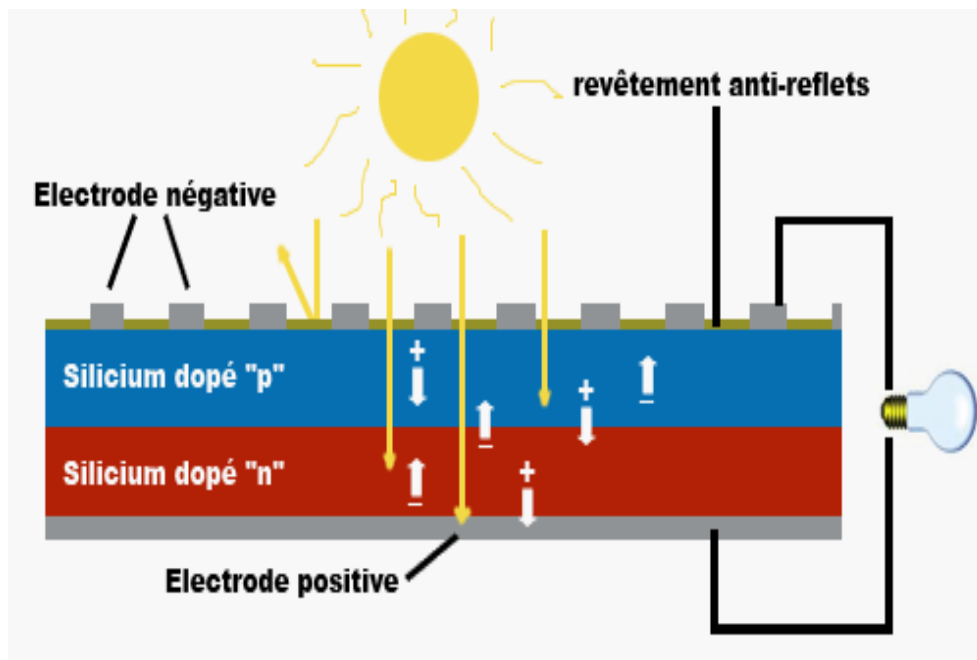


Figure I-8: schéma d'une cellule PV en silicium [12]

I.5.4 Caractéristique d'une cellule PV à base de silicium

Le fonctionnement d'une cellule PV dépend des conditions d'ensoleillement et de la température. [13]

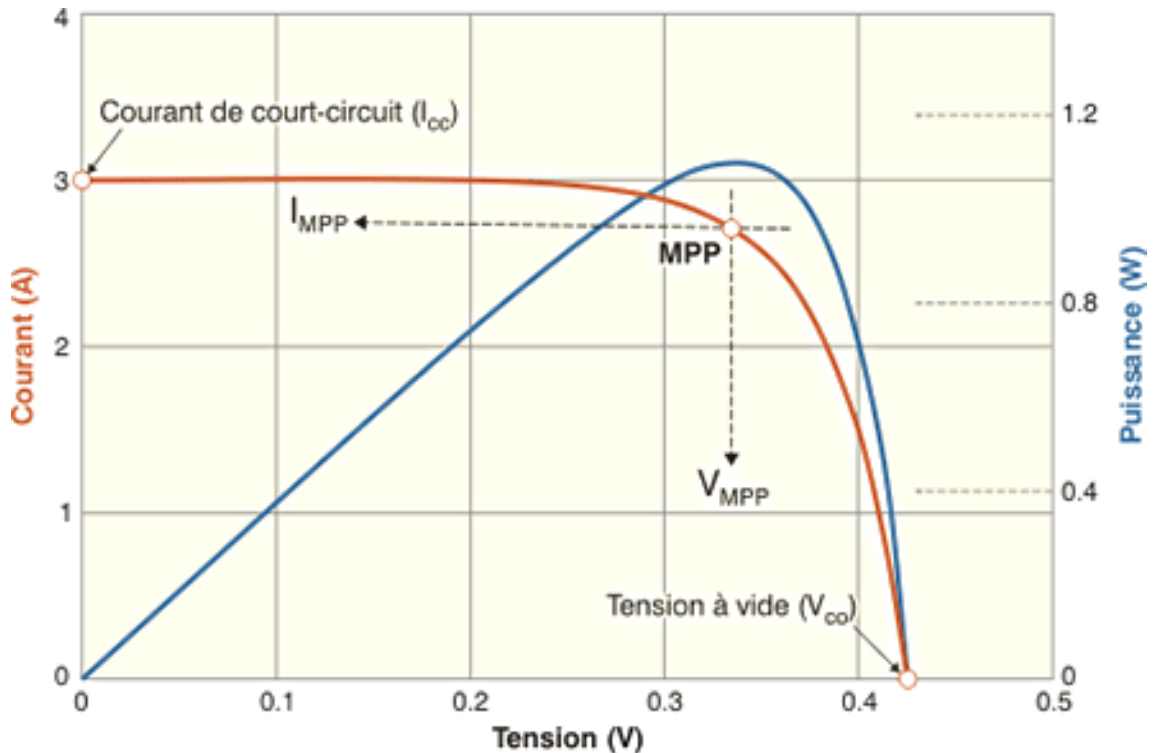


Figure I-9 : Caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ [14]

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) 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 représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant 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 et un courant optimaux : V_{MPP} , I_{MPP} (parfois appelés aussi V_{opt} , I_{opt}) [14].

I.5.5 Panneau photovoltaïque

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts soit approximativement 0.5 Volt. Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et /ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque [15].

I.5.5.1 Association en série:

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série (voir **figure I-10**) [16].

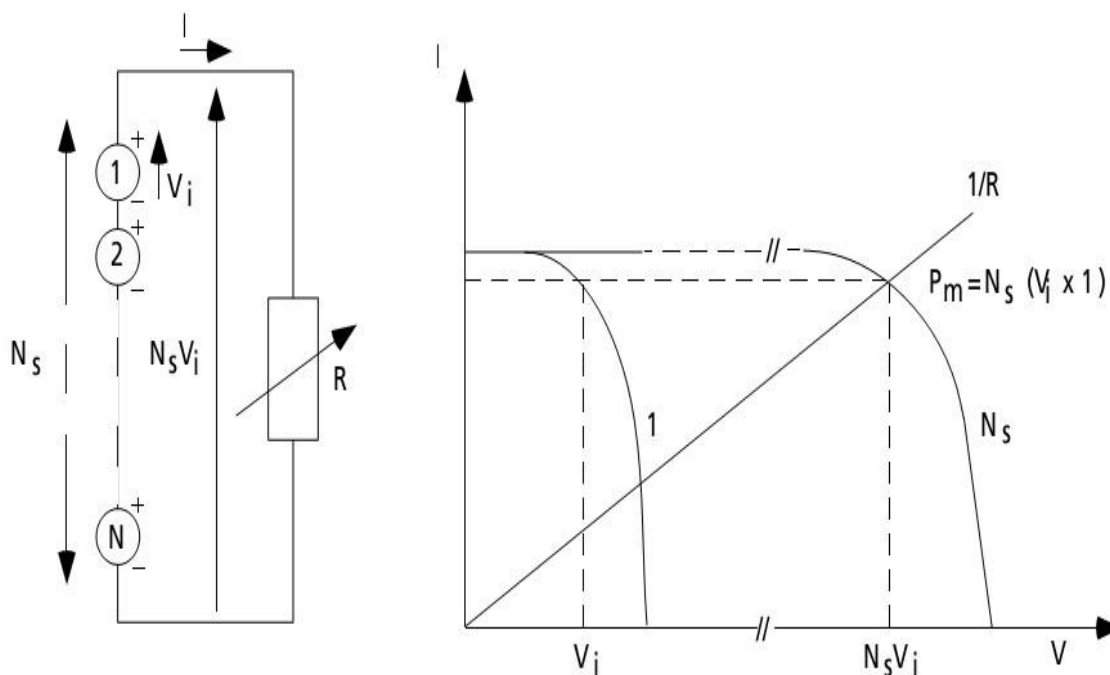


Figure I-10: Cellules identiques en série

I.5.5.2 Association en parallèle :

En additionnant des cellules ou des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche (voir **figure I-11**) [16].

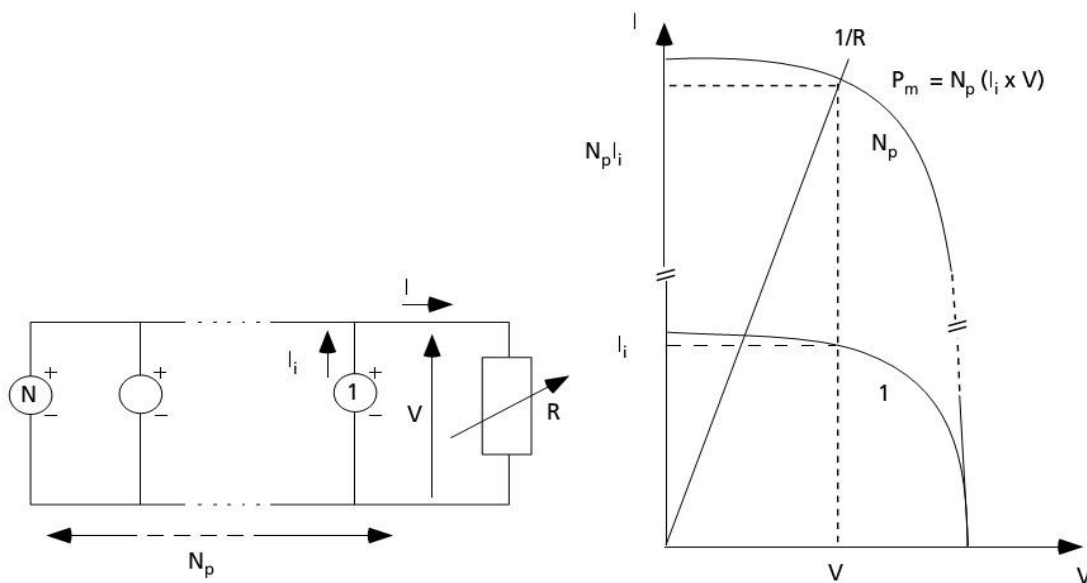


Figure I-11: Cellules identiques en parallèle

I.5.6 Protection des cellules PV

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout des diodes de protection. Une diode placée en série pour éviter le courant inverses et une en parallèle, dite diode by-pass,

qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules. Son rôle, est de limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée [13].

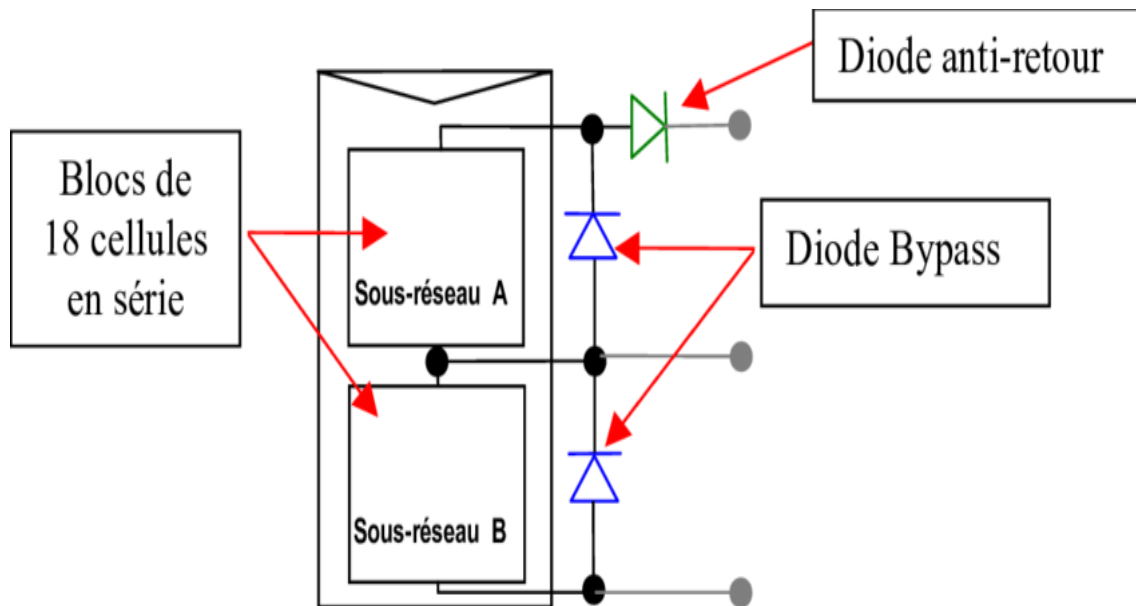


Figure I-12 : Schématisation d'un GPV avec diodes by-pass et diode anti-retour [17]

I.6 Type de système photovoltaïque

En fonction du service et du type d'application de cette forme de production d'énergie on peut distinguer plusieurs types.

I.6.1 Système connecté au réseau

Le raccordement d'un système PV au réseau de distribution permet l'injection totale ou partielle de l'énergie dans le réseau de distribution. Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau représentent la quasi-totalité des systèmes photovoltaïques installés en Europe, mais qui a du mal à s'imposer en Algérie à cause de la complexité de l'installation et l'obligation de substituer le réseau classique par un système de réseau intelligent [18].

I.6.2 Système autonome

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit [19]:

I.6.2.1 Système autonome sans stockage électrochimique

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour son démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque

de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairage le plus faible. Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de système autonome [19].

I.6.2.2 Système autonome avec stockage électrochimique

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes. Elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée. Donc, le stockage électrochimique est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques [19].

I.6.3 Système hybride

Le système hybride est la combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergies renouvelables, on prend comme exemple l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne, qui permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technico-économique [35].

I.7 Le stockage d'énergie électrique

Les lois de la physique nous apprennent qu'on ne peut pas stocker d'une façon directe l'électricité. Pour ça il faut la transformer en d'autres formes d'énergies potentiellement stockables, (mécanique, thermique, électrochimique ...ect). La transformation se fait à l'aide des convertisseurs réversibles capable par transformation inverse de récupérer l'énergie. Un classement des techniques de stockage peut se faire, selon leur nature d'applications, en deux catégories [20] :

- **Techniques de stockage à grande échelle** : dont les usages peuvent être utilisés par un gestionnaire de réseau. Ces techniques comprennent le stockage : sous forme d'énergie gravitaire (systèmes hydrauliques), sous forme d'énergie thermique, sous forme d'énergie de pression (air comprimé), et enfin sous forme chimique (batteries chimiques).
- **Techniques de stockage à moyenne et faible échelles** : dont les usages peuvent également servir le réseau, mais aussi la production décentralisée pour de nombreuses applications. Ces techniques comprennent le stockage : sous forme mécanique (volants d'inertie), sous forme électrochimique (accumulateurs et super-condensateurs), sous forme magnétique, ou sous forme d'air comprimé ou d'hydrogène (piles à combustible).

Dans les installations photovoltaïques, on fait appel à des stockages d'électricité dans des accumulateurs électrochimique. Ces systèmes remplissent la double fonction de stockage et de déstockage de l'électricité en alternant les phases de charge et de décharge. Ils présentent la propriété de pouvoir transformer de l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques en énergie électrique et réciproquement, sans émission de polluants, sans nuisances sonores et avec des conditions de maintenance réduites.

Actuellement, deux types d'accumulateurs sont utilisés dans les systèmes PV [9] :

- **Les accumulateurs au plomb-acide** sont les plus utilisés, ils fonctionnent par un électrolyte.
- **Les accumulateurs au nickel-cadmium** sont les plus fiables, les fabricants de ces batteries assurent qu'elles peuvent totalement déchargées sans aucun dommage.

I.7.1 Constitution d'une batterie solaire plomb-acide [20]

Une batterie au plomb est constituée par un ensemble d'accumulateurs. La tension nominale d'un accumulateur étant d'environ 2.1 V. Une batterie de 12 V est constituée de 6 accumulateurs en série et reliés par des connexions en plomb soudées. Ces accumulateurs sont logés dans un bac, le plus souvent en plastique.

- **Électrodes positives** : Ce sont des grilles, en alliage binaire ou ternaire de plomb (Pb-Sb, Pb-Sn, Pb-Ca, Pb-Sb-As...) dont les alvéoles sont remplis d'une pâte poreuse de PbO_2 (matériau actif aux électrodes positives).
- **Electrodes négatives** : Ils sont comparables aux grilles positives et sont remplies de plomb métalliques très poreux (matériau actif aux électrodes négatives) : on parle d'éponge de plomb métalliques. Les électrodes sont souvent appelées « plaques » en raison de leur forme.
- **Séparateurs** : Evite le contact entre électrodes positives et négatives. Les séparateurs sont le plus souvent constitués par un feutre de fibres cellulosiques, protégées par une résine ou encore par du chlorure de polyvinyle fritté ou des feutres en fibre de verre possédant des qualités remarquables :
 - Isolant électrique parfait.
 - Grande perméabilité aux ions.
 - Barrière pour les particules de matières.
 - Porosité élevée.
 - Excellente tenue à l'acide sulfurique.

I.7.2 Caractéristiques principales d'une batterie [20]

Parmi les caractéristiques de la batterie, nous pouvons citer :

- **Capacité en Ampère heure (Ah)**: Les ampères heurs d'une batterie sont simplement le nombre d'ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant.
- **Densité d'énergie massique Wh/kg (ou volumique Wh/l)**: Cela correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse (ou de volume) de l'accumulateur.
- **Densité de puissance massique**: En watt par kilogramme (W/kg).
- **Cyclabilité (Exprimée en nombre de cycles)**: caractérise la durée de vie de l'accumulateur.

I.8 Convertisseurs statique

Le convertisseur d'énergie a un rôle d'adapter le transfert de l'énergie entre le générateur photovoltaïque et la charge. Il peut être un convertisseur DC/AC pour une charge à courant alternatif ou un convertisseur DC/DC pour une charge à courant continu.

I.8.1 Convertisseur DC/DC (hacheur)

Ils ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe [21].

➤ Hacheur dévolteur (ou Buck)

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée [22]. La topologie du convertisseur «Buck» est donnée par la **Figure I-13**. Les composants clés sont l'inductance (L), le commutateur (S), la diode (D) et le condensateur (C). Celui-ci se charge par le commutateur (S) et qui maintient la tension à ces bornes jusqu'à l'ouverture de (S) qui fait décharger son énergie à travers la diode sur le charge (R) pour un cycle de période de fonctionnement [23].

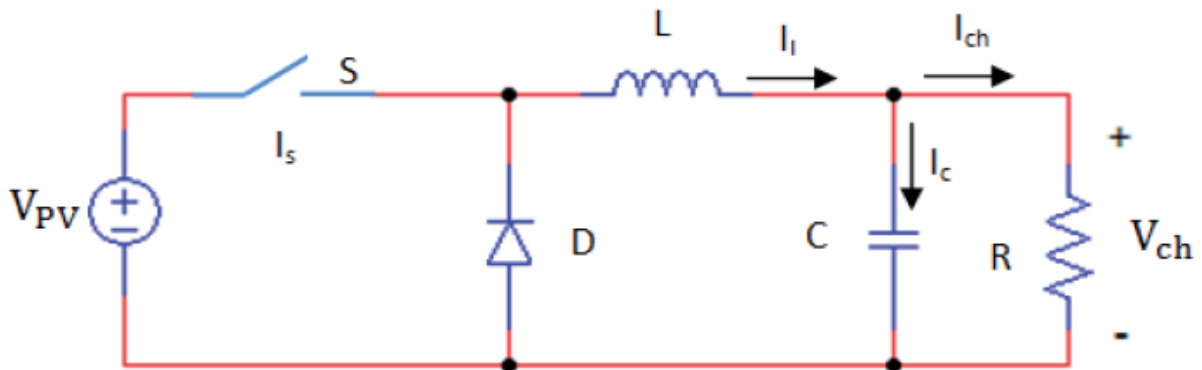


Figure I-13 : Schéma électrique équivalent d'un hacheur série [23]

➤ Hacheur survolteur (ou Boost)

Dans ce hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée [22].

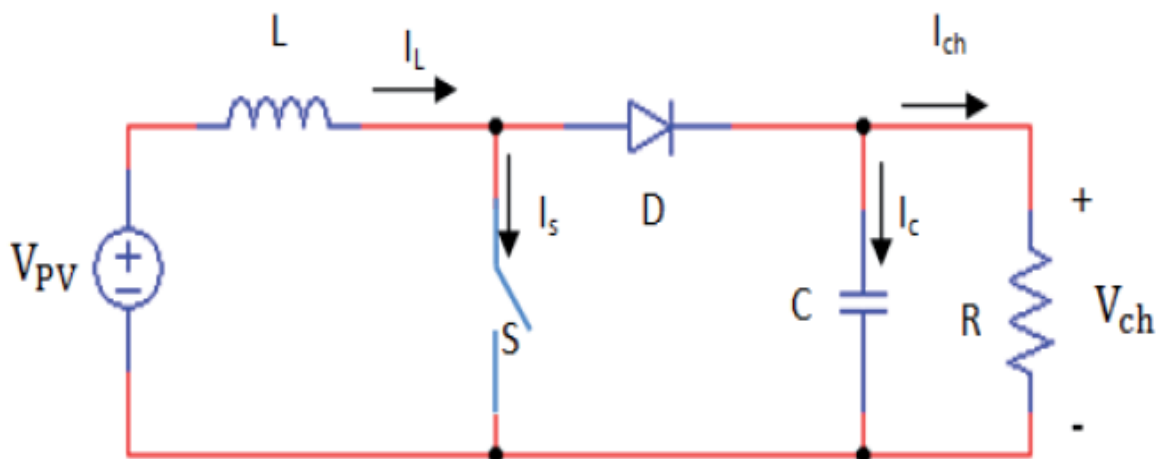


Figure I-14: Schéma électrique équivalent d'un hacheur parallèle [23]

L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie. Au premier temps (αT), l'interrupteur (S) est fermé,

le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. L'interrupteur (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'oppose à la diminution de courant (I_L), génère une tension qui s'ajoutera à la tension de la source. Elle sera appliquée sur la charge (R) à travers la diode (D) [25].

➤ **Hacheur dévolteur/survolteur (ou Buck-Boost)**

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse [26].

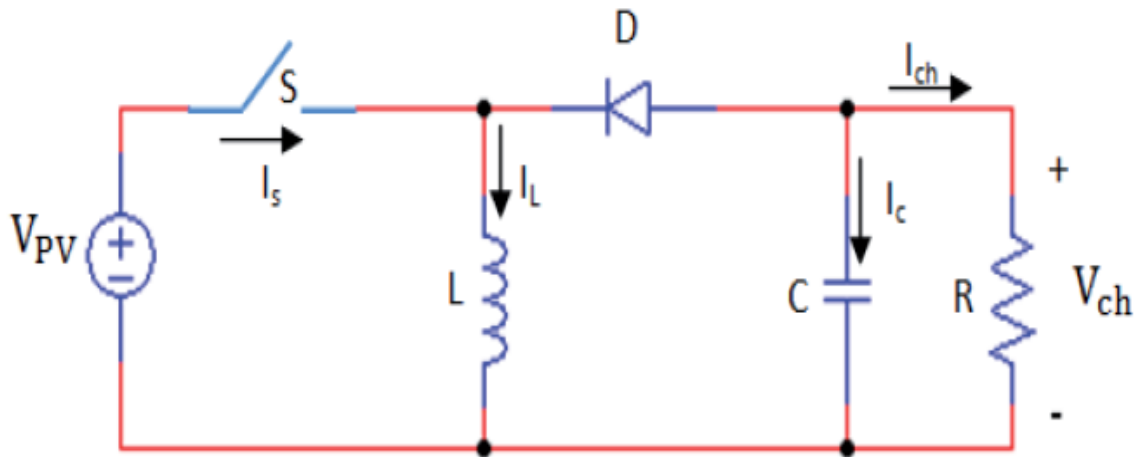


Figure I-15 : Schéma électrique équivalent d'un hacheur Buck-Boost [23]

La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Lorsque l'interrupteur (S) est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; tandis que, lorsque le commutateur (S) tourne sur la position (off), la tension à travers l'inductance (L) est renversée, l'énergie stockée se transfère vers la charge (R) via la diode (D) [23].

I.8.2 Convertisseur DC/AC (onduleur)

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé [24].

I.9 Boîtes de jonction

Dans un système photovoltaïque, les modules sont divisés en strings et en champs. Le raccordement en série des modules s'effectue depuis les modules eux-mêmes, tandis que des boîtes de jonction sont utilisées pour le branchement en parallèle des strings [27].

I.10 Mise à la terre

La mise à la terre d'une installation photovoltaïque est obligatoire pour assurer la protection des équipements et des personnes. Pour cela elle doit subvenir à la conformité des normes du constructeur et aux normes UTE 15-712 et UTE 15-100. Son malfaçon peut

avoir des conséquences graves comme la détérioration des biens et la mise en danger de la vie d'autrui.

I.11 Normes concernant les installations photovoltaïques [28]

La conception et la mise en œuvre des installations photovoltaïques sont encadrées par, la norme NF C15-100 qui traite des installations électriques à basse-tension (BT), étant une norme d'application obligatoire. Cette norme a été amendée en août 2008 pour que les installations photovoltaïques fassent partie des installations électriques entrant dans son champ d'application, il y est précisé que "Les installations photovoltaïques sont traitées dans le guide UTE C 15-712".

- **Le guide UTE C15-712-1** Ce guide traite tous les composants des installations photovoltaïques : modules photovoltaïques, circuit à courant continu, onduleurs, circuits à courant alternatif et raccordement au réseau.

La version initiale date de février 2008, et a été rédigé par une Commission de l'Union Technique de l'Electricité (UTE) constituée d'experts en génie électrique. Une troisième et nouvelle version de ce guide a été publiée au 1er juillet 2013.

- **le guide UTE C15-712-2** de Juillet 2013, traitant des "Installations photovoltaïques autonomes non raccordées au réseau public de distribution avec stockage par batterie"
- **La norme expérimentale XP C15-712-3** de Février 2016 traitant des "Installations photovoltaïques avec dispositif de stockage et raccordement à un réseau public de distribution".

I.12 La gestion d'énergie photovoltaïque

Dans un système photovoltaïque, il est primordial de gérer de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants. Le module de supervision a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents constituants du système d'une part mais aussi de réguler le processus de charge/décharge de stockage d'une autre part. Son choix est guidé par un cahier de charge qui tient compte du prix, de la consommation d'énergie, de la fiabilité et de l'intégration au système photovoltaïque [21].

I.13 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

I.13.1 Les avantages

- Ils sont des fonctionnements sûrs, non polluants et silencieux,
- Ils sont très fiables,
- Ils n'exigent presque aucun entretien,
- Ils sont compétitifs dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales,

- Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment,
- Ils présentent une autonomie accrue, un fonctionnement indépendant du réseau et un système de secours pendant les pannes d'électricité.
- Les systèmes raccordés au réseau sont économiques, surtout parce que le coût actuel de la technologie PV est beaucoup plus élevé que celui de l'énergie traditionnelle.

I.13.2 Les inconvénients

Les systèmes solaires électriques ont aussi des limites :

- Ils ne conviennent pas aux utilisations à forte consommation d'énergie,
- Ils sont dépendants des conditions météorologiques.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Il est impératif d'utiliser des appareils économes en énergie
- Il est difficile de stocker de l'énergie solaire.
- Il existe un décalage entre la période de production et de la consommation.

I.14 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de définir quelques moyens de conversion de l'énergie renouvelable solaire, en particulier la conversion photovoltaïque. On a mis en évidence son principe de fonctionnement et ces différentes technologies. Nous avons également essayé de détailler et d'identifier les majors parties constituantes de ce type d'installation tout en expliquant vaguement son processus de production.

Nous allons à présent entamer dans le chapitre suivant, la modélisation des éléments principaux figurants dans une installation photovoltaïque, et aussi proposer une optimisation du générateur PV afin d'avoir un fonctionnement optimal.

II.1 Introduction

Après avoir identifié et cité les différents composants de notre système, nous allons procéder à sa modélisation. Ceci nécessite l'identification d'un ensemble d'équations et de modèles mathématiques qui caractérisent chaque élément que comporte notre mécanisme. L'objectif de cette modélisation est de construire une procédure de simulation sous le logiciel *Matlab-Simulink*, pour déterminer les caractéristiques dynamiques du panneau photovoltaïque et de la batterie. À partir de ces composants, nous allons finalement optimiser le system de production pour augmenter son rendement.

➤ Description du système à étudier

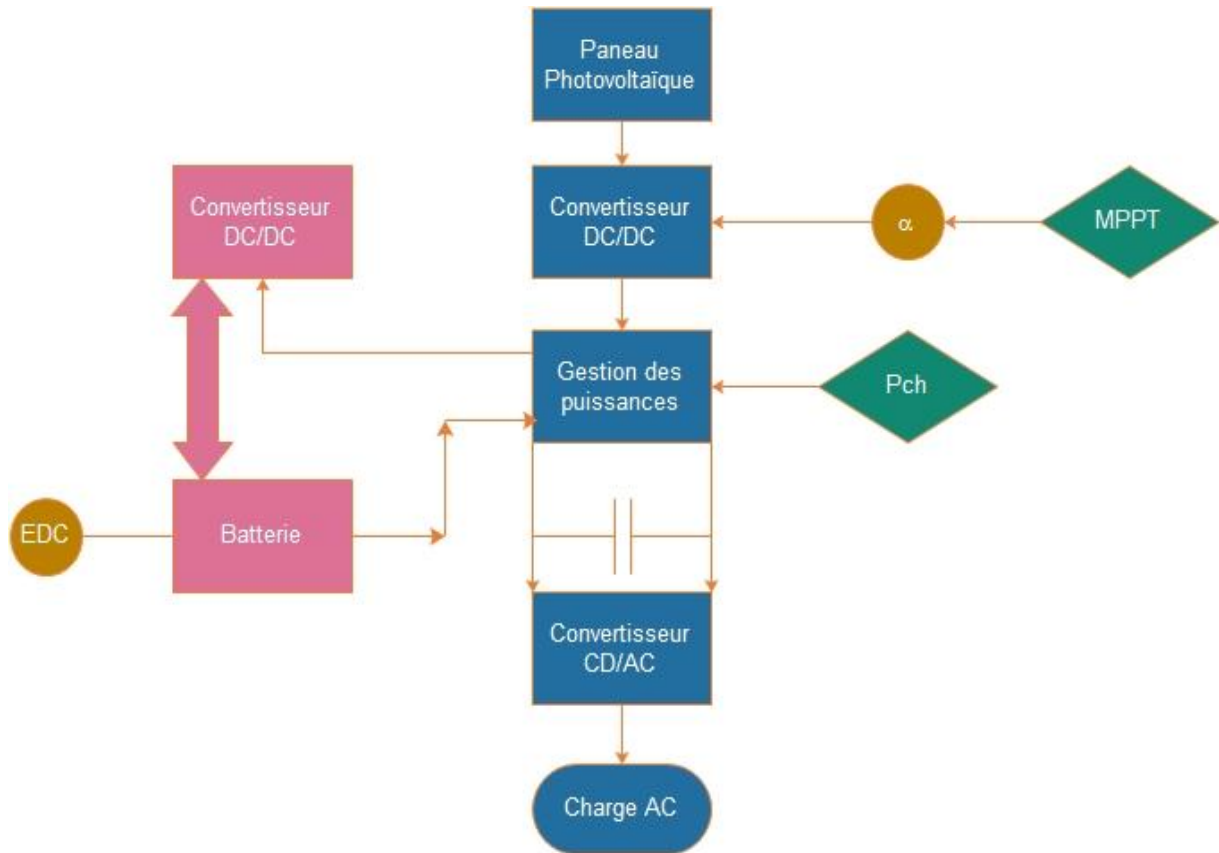


Figure II-1: Système globale à étudier

II.2 Modélisation du générateur PV

La modélisation du générateur PV a pour but d'obtenir les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour l'analyse et l'évolution des performances des systèmes photovoltaïques. Ces derniers sont modélisés mathématiquement. Ces modèles se différencient par la procédure de calcul, la précision et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de ces caractéristiques.

II.2.1 Le modèle d'une cellule photovoltaïque [29]

La cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. La modélisation du comportement électrique du module photovoltaïque peut être étendue au générateur photovoltaïque selon sa configuration et le nombre de modules en série et en parallèle.

➤ **Le courant de court-circuit I_{cc}**

Il définit la quantité des paires électron-trou G créé qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et trous (L_n et L_p), respectivement.

$$I_{cc} = qG(L_n + L_p) \quad (\text{II-1})$$

I_{cc} : Courant de court-circuit de la cellule.

➤ **La tension en circuit ouvert V_{op}**

C'est la tension pour laquelle la diode à l'obscurité ($I = 0$) fournit un courant égal au courant de court-circuit I_{cc} . Elle est obtenue à partir de l'équation ;

$$V_{oc} = V_{th} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s}\right) \quad (\text{II-2})$$

$$V_{th} = \frac{A \cdot k \cdot T_c}{q} \quad (\text{II-3})$$

I_s : Courant de saturation de la diode.

V_{th} : Tension thermique.

T_c : Température de la jonction.

k : Constante de Boltzmann $1.38 \cdot 10^{-23}$ (J/K).

A : Coefficient d'idéalité de la cellule.

q : Charge élémentaire ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C).

➤ **Le facteur de forme FF**

Il définit l'efficacité de la cellule solaire, il est obtenu comme suit :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (\text{II-4})$$

V_m : Tension de point de puissance maximale (V).

I_m : Courant de point de puissance maximale (A).

➤ **Point de puissance maximale**

Il représente le point (V_m, I_m) où la puissance dissipée dans la charge est maximale.

$$P_m = V_m \cdot I_m \quad (\text{II-5})$$

P_m : Point de puissance maximale (W).

➤ **La puissance du flux lumineux incident**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$P_{in} = S \cdot E \quad (\text{II-6})$$

E: L'ensoleillement qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface (W/m²).

S : La surface effective des cellules.

➤ **Température de jonction**

La température de la jonction T_J de la cellule est donnée par la relation suivante :

$$T_J = T_a + E_s \left[\frac{NOCT - 20}{800} \right] \quad (\text{II-7})$$

NOCT : Température nominale de fonctionnement de la cellule ou du module solaire.

T_a : Température ambiante.

➤ **Rendement de conversion d'énergie η**

C'est le rapport de la puissance maximale générée et de la puissance du rayonnement solaire Incident.

$$\eta = FF \frac{I_{cc} V_m}{P_{in}} \quad (\text{II-8})$$

$$\eta = FF \frac{I_{cc} V_m}{E \cdot S} \quad (\text{II-9})$$

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (\text{II-10})$$

II.2.2 Les modèles mathématique

II.2.2.1 Le modèle à une diode

C'est le modèle le plus utilisé dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physiques de polarisation et deux résistances une en série et une autre en parallèle [30]. Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ de la cellule ou du module photovoltaïque [30] :

- la résistance série R_s est la résistance interne de la cellule ou du module, elle est principalement la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- la résistance parallèle R_p est due à un courant de fuite au niveau de la jonction. Elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

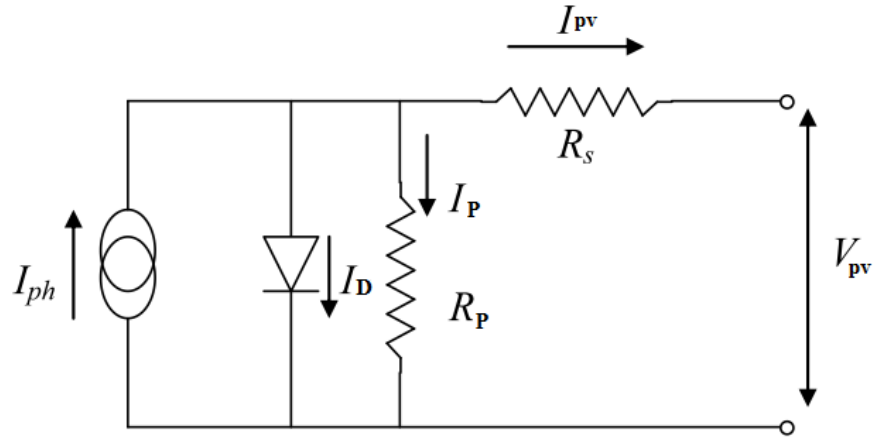


Figure II-2 : Schéma équivalent d'une cellule PV modèle à une diode

- Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_P \quad (\text{II-11})$$

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

I_{ph} : Photo courant.

I_D : Courant de diode.

I_P : Le courant shunt.

- Le courant produit par la photopile est donné par :

$$I_{ph} = P_1 E_s \left(1 + P_2 (E_s - E_{sref}) + P_3 (T_J - T_{Jref}) \right) \quad (\text{II-12})$$

E_{sref}, T_{Jref} : représentent l'éclairement et la température sous condition STC.

P_1, P_2, P_3 : Paramètres constants.

- Le courant de la diode est donné par :

$$I_D = I_{0d} \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{k \cdot A \cdot N_s \cdot T_J} \right) - 1 \right] \quad (\text{II-13})$$

Avec :

$$I_{0d} = P_4 \cdot T_J^3 \cdot \exp \left[\frac{E_g}{k \cdot T_J} \right] \quad (\text{II-14})$$

I_{0d} : Courant de saturation de la diode (A).

N_s : Nombre totale de cellules connectées en séries et /ou en parallèles.

E_g : Énergie de gap (paramètre caractéristique du matériau pour le Si $1.76 \cdot 10^{-19}$

P_4 : Paramètre constant.

- Le courant de la résistance shunt est donné par

$$I_p = \frac{V_{pv}}{R_p} \quad (\text{II-15})$$

- L'équation globale modélisant le générateur photovoltaïque est la suivante :

$$I_{pv} = P_1 E \left(1 + P_2 (E - E_{sref}) + P_3 (T_J - T_{Jref}) \right) - P_4 \cdot T_J^3 \cdot \exp \left[\frac{E_g}{k \cdot T_J} \right] \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{k \cdot A \cdot N_s \cdot T_J} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_p} \quad (\text{II-16})$$

II.2.2.2 Modèle simplifié du modèle à une diode [31]

Ce modèle est plus simplifié exigeant peu de paramètres à estimer, c'est un modèle uniquement avec une diode.

- L'expression du courant photovoltaïque est donné par :

$$I_p = I_{cc} \left(1 - K_1 \exp(K_2 V_{pv}^m - 1) \right) \quad (\text{II-17})$$

Où les coefficients K_1, K_2, K_3, K_4 et m sont des constantes calculées indépendamment à partir des conditions Standard test météorologiques (STC). Ils sont donnés par les formules suivantes :

$$K_1 = 0.01175 \quad (\text{II-18})$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{ov}^m} \quad (\text{II-19})$$

$$K_3 = \ln \left[\frac{I_{cc}(1 + K_1) - I_m}{K_1 I_{cc}} \right] \quad (\text{II-20})$$

$$K_4 = \ln \left(\frac{1 + K_1}{K_1} \right) \quad (\text{II-21})$$

$$m = \frac{\ln \left[\frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[\frac{V_m}{V_{oc}} \right]} \quad (\text{II-22})$$

I_m : Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum (I_{opt}).

V_m : Tension au point de puissance maximale appelé aussi tension optimale (V_{opt}).

Il est à noter que l'équation (II-17) est applicable que pour un niveau d'insolation E et de température particuliers, relatif aux conditions standard de fonctionnement. Quand l'insolation et la température varient, le courant I_{pv} et la tension V_{pv} changent suivant les équations suivantes :

$$\Delta T_J = T_J - T_{Jref} \quad (II-23)$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{cc} \left(\frac{E}{E_{ref}} \right) \Delta T_J + \left(\frac{E}{E_{ref}} - 1 \right) I_{cc,ref} \quad (II-24)$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{oc} \Delta T_J - R_s \Delta I_{pv} \quad (II-25)$$

Avec :

ΔT_c : Représente la variation de la température.

ΔI_{pv} : Représente la variation du courant par rapport à l'insolation et à la température.

ΔV_{pv} : Représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température.

α_{cc} : Représente un coefficient de température, d'incrément de courant I_{cc} quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ($A/^\circ C$) (sous les conditions standard de fonctionnement).

β_{oc} : Représente un coefficient de température, d'incrément de tension V_{oc} quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ($V/^\circ C$) (sous les conditions standard de fonctionnement).

α_{cc} et β_{oc} : sont appelés coefficients de température.

Les nouvelles valeurs de la tension et du courant photovoltaïque sont donnés par :

$$V_{pv,nouv} = V_{pv} + \Delta V_{pv} \quad (II-26)$$

$$I_{pv,nouv} = I_{pv} + \Delta I_{pv} \quad (II-27)$$

II.2.2.3 Modèle explicite [32]

Il est développé par Borowy et Salameh en (1996). Ce modèle explicite se caractérise par sa résolution très simple. Il nécessite seulement quatre paramètres I_{cc}, V_{co}, I_m et V_m .

$$I = I' + \Delta I \quad (II-28)$$

$$I = I_{cc} \left[1 - C_1 \exp \left(\frac{n_2 V}{C_2 V_{oc}} \right)^{-1} \right] + \Delta I \quad (II-29)$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}} \right) \exp \left(- \frac{V_m}{C_2 V_{oc}} \right) \quad (II-30)$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_m}{V_{oc}} - 1}{\ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}} \right)} \quad (II-31)$$

$$\Delta I = \alpha_{ref} \left(\frac{E}{E_{ref}} \right) (T_J - T_{Jref}) + \left(\frac{E}{E_{ref}} - 1 \right) I_{cc} \quad (II-32)$$

$$V = V' + \Delta V \quad (II-33)$$

$$\Delta V = \beta_{ref}(T_J - T_{Jref}) + R_s \Delta I \quad (\text{II-34})$$

II.2.2.4 Modèle à deux diodes [33]

Ce modèle est représenté par son schéma électrique équivalent qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, les pertes sont modélisé par deux résistances, une résistance shunt R_p , une résistance série R_s et deux diodes pour la polarisation de la cellule et le phénomène de la recombinaison des porteurs minoritaires.

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

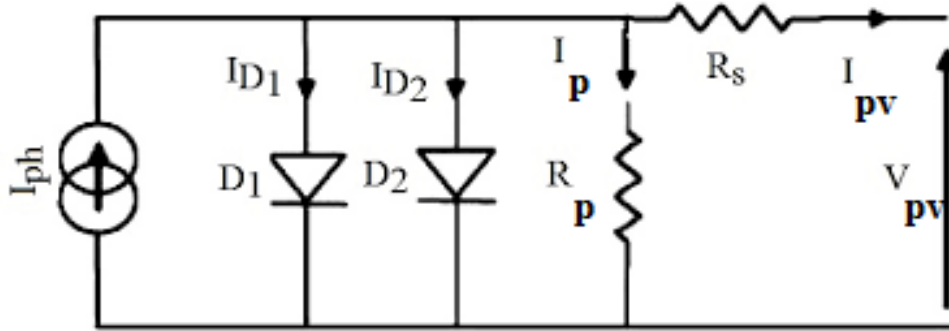


Figure II-3 : Schéma équivalent d'une cellule PV modèle à deux diodes

- Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_p \quad (\text{II-35})$$

Avec :

$$I_{d1} = I_{s1} \exp\left(\frac{V + IR_s}{An_sKT_J}\right)^{-1} \quad (\text{II-36})$$

$$I_{d2} = I_{s2} \exp\left(\frac{V + IR_s}{2An_sKT_J}\right)^{-1} \quad (\text{II-37})$$

I_{s1} , I_{s2} sont les courants de saturation des diodes :

$$I_{s1} = P_4 T_J^3 \exp\left(-\frac{E}{KT_J}\right) \quad (\text{II-38})$$

$$I_{s2} = P_5 T_J^3 \exp\left(-\frac{E}{2KT_J}\right) \quad (\text{II-39})$$

I et I_p garderont les mêmes expressions que celles du modèle à une diode.

Alors, le courant résultant I_{pv} s'écrit :

$$\begin{aligned}
 I_{pv} = & P_1 E \left[1 + (E - E_{ref}) + P_3 (T_J - T_{Jref}) \right] \\
 & - P_4 T_J^3 \exp\left(\frac{E_g}{KT_J}\right) \exp\left(q \frac{V + R_S I_{pv}}{An_s KT_J}\right)^{-1} \\
 & - P_5 T_J^3 \exp\left(\frac{E_g}{2KT_J}\right) \exp\left(q \frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{2An_s KT_J}\right)^{-1} - \frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{R_p}
 \end{aligned} \tag{II-40}$$

Dans notre travail, nous avons choisi le modèle à une diode.

Tableau II-1 : Paramètres obtenus du modèle à une diode du panneau PV SM110 [24]

P1	P2	P3	P4	A	R _p	R _s
0.00345	0.58.10 ⁻⁵	-0.336.10 ⁻⁴	31.2367	1	0.614	150.16

Tableau II-2 : Paramètres électriques du panneau SIEMENS [24]

Paramètres	Valeurs
Puissance max du panneau P _m	110W
Puissance nominale P _n	110W
Courant au point de puissance max I _m	3.15 A
Tension au point de puissance max V _m	35 V
Courant de court-circuit I _{cc}	3.45A
Tension en circuit ouvert Voc	43.5 V
Coefficient d'incrémentatation du courant I _{cc} (α _{cc})	1,4 mA/°C
Coefficient d'incrémentatation de la tension Voc (β _{oc})	-152 mV/°C

II.2.3 Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du panneau photovoltaïque

Dans l'objectif de tracer les courbes qui représentent les caractéristiques I_{pv}-V_{pv} et P_{pv}-V_{pv}, selon les conditions éventuelles des paramètres de température et d'ensoleillement, nous avons procédé à une série de simulations sous l'environnement Matlab-Simulink. Pour analyser l'influence de la température, nous avons soumis notre système à différents niveaux thermiques et maintenu constante la valeur de l'ensoleillement (1000W/m²). Les courbes correspondantes sont représentées par les **figures II-4** et **II-5**. Pour le cas de l'influence de l'ensoleillement, nous avons mis notre système sous une température stable de 25° C et nous avons appliqué différentes valeurs de l'intensité de l'irradiation solaire. Les résultats sont reportés par les **figures II-6** et **II-7**.

II.2.3.1 Influence de la température :

Pour voir l'influence de la température, nous avons tracé les caractéristiques P_{pv}-V_{pv} et I_{pv}-V_{pv}, pour différents niveaux de température, et avec un ensoleillement constant E=1000W/m².

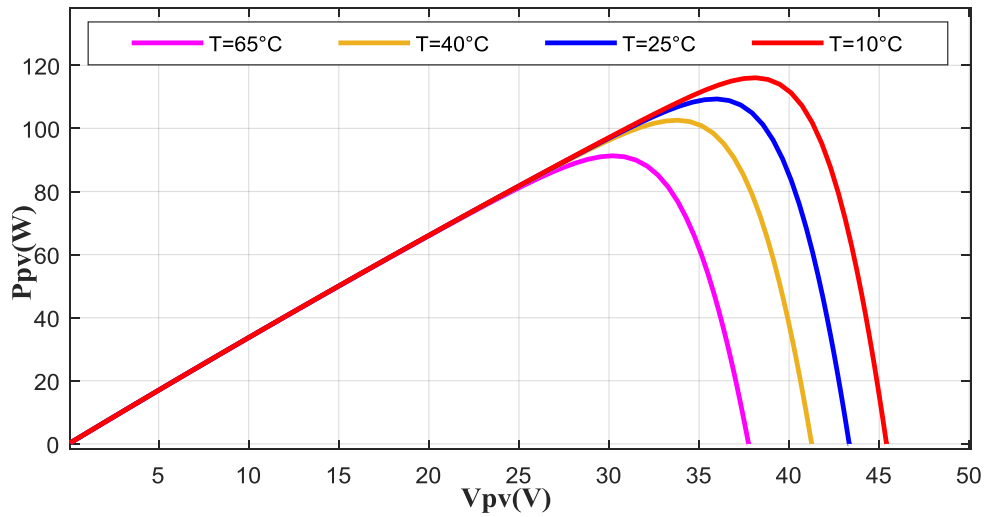


Figure II-4 : Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$

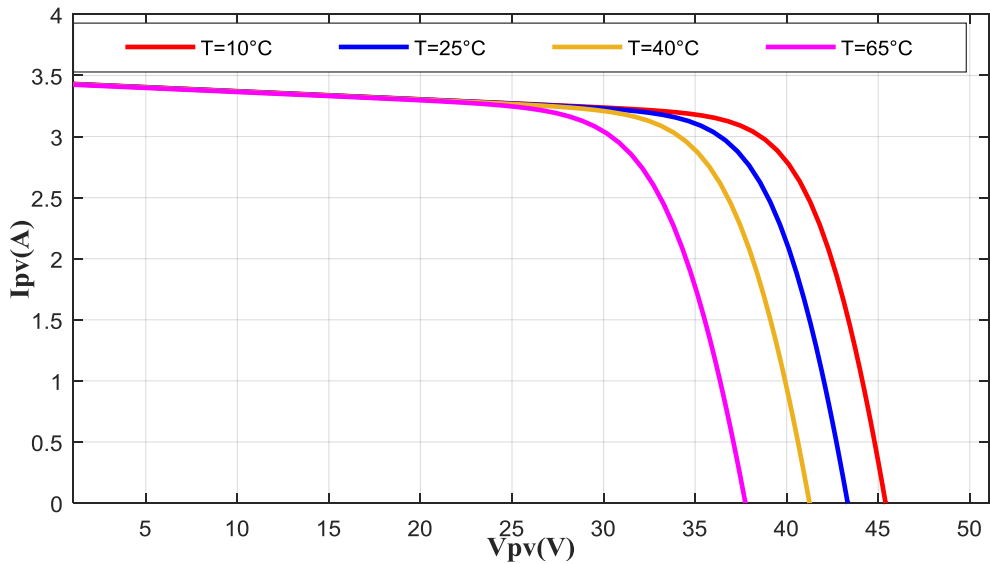


Figure II-5 : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$

II.2.3.2 Influence de l'irradiation solaire :

Pour voir l'influence de l'ensoleillement, nous avons tracé les caractéristiques $P_{pv}-V_{pv}$ et $I_{pv}-V_{pv}$, pour différentes valeurs d'ensoleillements mais à une température constante $T=25^{\circ}\text{C}$.

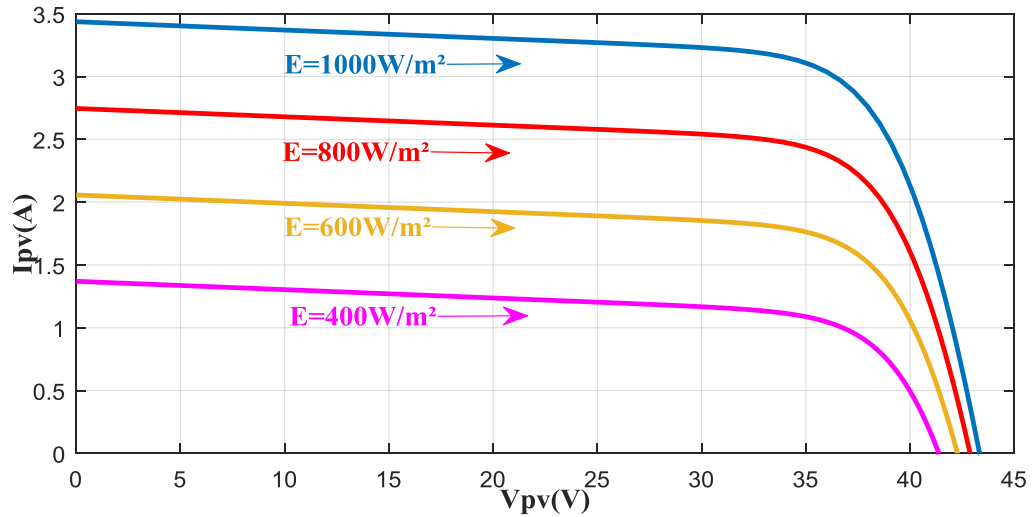


Figure II-6: Influence de l'irradiation sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$

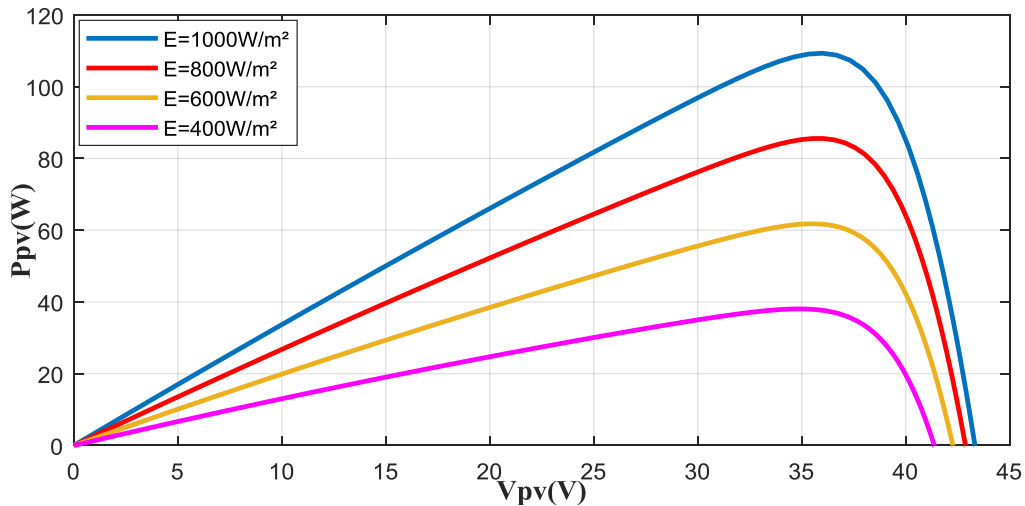


Figure II-7 : Influence de l'irradiation sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$

Interprétation des résultats :

Les courbes obtenues lors de cette simulation nous font remarquer que les caractéristiques $P_{pv}(V_{pv})$ et $I_{pv}(V_{pv})$ réagissent de manière contradictoire lorsqu'on leur impose des variations en intensité de température et d'ensoleillement. En augmentant l'amplitude d'éclairement, on constate que les deux caractéristiques accroissent simultanément, contrairement aux effets de température qui sont proportionnellement inverses. On enregistre des pertes brusques de puissance maximale lorsque le système est soumis à une élévation de température ou à une diminution de l'ensoleillement.

II.3 Modélisation des convertisseurs statiques

II.3.1 Modélisation du hacheur élévateur de tension (Boost) [34]

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la figure II-8 représente le circuit électrique du Boost. Dans un premier temps, le transistor S est

fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure elle emmagasine de l'énergie jusqu'à la fin de la première période. Dans un second temps, le transistor S s'ouvre et l'inductance L s'opposant à la diminution du courant génère une tension qui s'ajoute à la tension de source qui s'applique sur la charge R_{ch} à travers la diode D.

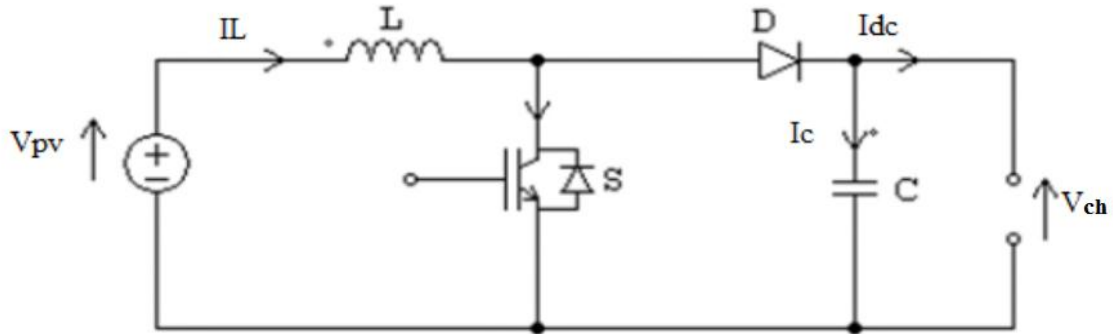


Figure II-8 : hacheur survolteur (boost)

Les grandeurs électriques de sorties (V_{ch} et I_{ch}) dans le convertisseur élévateur sont liées à celles d'entrées (V_{pv} et I_{pv}) en fonction du rapport cyclique (α) du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur par les relations suivantes :

$$L \frac{dI_L}{dt} = V - (1 - \alpha)V_{ch} \quad (II-39)$$

$$C \frac{dV_{ch}}{dt} = (1 - \alpha)I_L - \frac{V_{ch}}{R} \quad (II-40)$$

$$R_{ch} = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \quad (II-41)$$

II.3.2 Modélisation de l'onduleur

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Les onduleurs utilisés pour le pompage sont en général à fréquence variable afin de permettre une variation de la vitesse de rotation de la pompe. A partir du schéma de l'onduleur triphasé présenté sur la figure II.4, on développera les différentes équations qui modélisent le fonctionnement de ce dernier. Pour simplifier l'étude on suppose que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge est équilibrée, couplée en étoile.

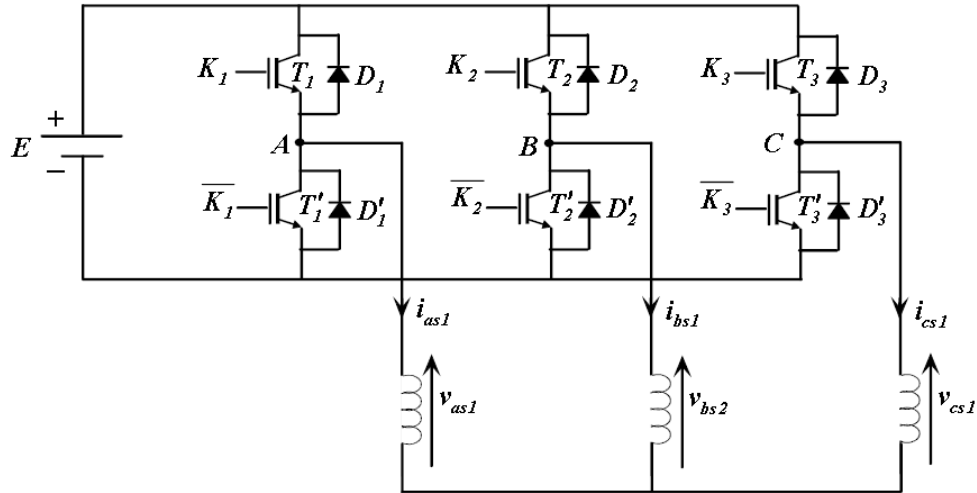


Figure II-9 : Circuit électrique de l'onduleur

Nous supposons que les interrupteurs sont idéaux et la charge triphasée est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé :

Les tensions composées V_{ab} , V_{bc} et V_{ca} sont obtenues à partir de ces relations :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} \end{cases} \leftrightarrow \begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (\text{II-42})$$

Avec : V_{ao}, V_{bo}, V_{co} , sont les tensions à l'entrée de l'onduleur (continues). On a pris le point milieu «O» d'un diviseur fictif à l'entrée comme référence pour ces dernières tensions.

Les trois tensions à l'entrée continue sont données par la relation de Chale comme suit :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (\text{II-43})$$

Avec : V_{an}, V_{bn} et V_{cn} sont les tensions de phase de la charge, ou de sortie de l'onduleur et V_{no} : est la tension du neutre de la charge par rapport au point fictif «O».

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II-44})$$

En remplaçant (II-43) dans (II- 44) on aura :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II-45})$$

En introduisant (II-45) dans (II-43) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} + 2V_{bo} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} - V_{bo} + 2V_{co}) \end{cases} \quad (\text{II-46})$$

A partir du système d'équations (II-46), on tire la matrice qui assure le passage du continu vers l'alternatif et qui donne le modèle de l'onduleur par les équations matricielles suivantes :

$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{pmatrix} \quad (\text{II-47})$$

Le courant d'entrée de l'onduleur est donné par :

$$I_{ac} = S_1 I_a + S_2 I_b + S_3 I_c \quad (\text{II-48})$$

Avec : S_1 , S_2 , et S_3 des fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur pour un seul bras (égale à 1 si l'interrupteur est fermé et à 0 si l'interrupteur est ouvert).

II.3.3 Modélisation du hacheur Buck-Boost [24]

Le hacheur, fréquemment utilisé dans les systèmes photovoltaïques, est de type dévolteur-survolteur « Buck - Boost » qui présente une alternative pour extraire le maximum de puissance. Ainsi, pour un ensoleillement faible, le convertisseur fonctionne en Boost ou survolteur et pour un ensoleillement conséquent, la variation du rapport cyclique, impose un fonctionnement en Buck ou dévolteur.

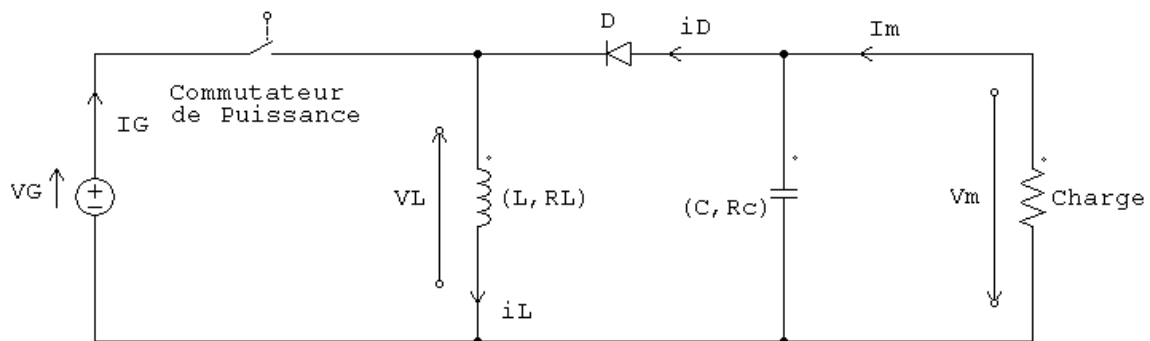


Figure II-10: Hacheur Buck-Boost

Le rapport cyclique α ajuste la tension et le courant de sortie tel que :

$$V_m = \frac{-a}{(1-a)} \cdot V_G \quad (\text{II-49})$$

$$I_m = \frac{1-a}{a} \cdot I_G \quad (\text{II-50})$$

Après introduction des paramètres réels du circuit, la relation devient :

$$V_m = \frac{-a}{1-a} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_L}{R} \cdot (1-a)} V_G \quad (\text{II-51})$$

Le modèle moyen du hacheur est alors donné par :

$$R_L i_L + L \cdot \frac{d}{dt} i_L = 2a \cdot V_G \quad (\text{II-52})$$

$$i_C(t) = C \cdot \frac{d}{dt} V_C + \frac{(V_m - V_C)}{R_C} = (1-a) i_L - \frac{V_m}{R} \quad (\text{II-53})$$

II.4 Modélisation du filtre

Le couplage entre le générateur photovoltaïque, la batterie et l'onduleur est fait par l'intermédiaire d'un bus continu. Il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit [35].

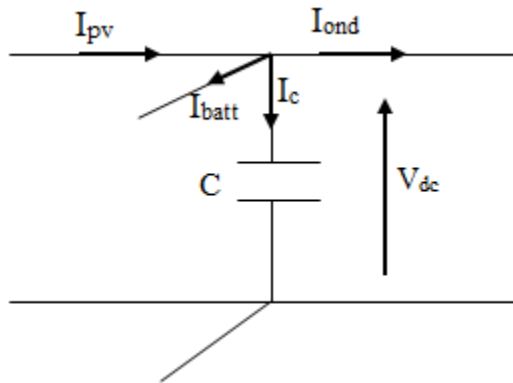


Figure II-11 : Modèle du bus continu

A partir de la **Figure II-11**, on peut écrire l'équation suivante :

$$I_C = I_{pv} - I_{ond} \neq (I_{batt}) \quad (\text{II-54})$$

La tension V_{dc} est une fonction du courant I_C :

$$I_C = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (\text{II-55})$$

C : Capacité du condensateur.

II.5 Modélisation de la batterie

Etant donné la grande diversité de type d'éléments de batterie ainsi que le nombre très varié de paramètres qui interviennent (l'état de charge, la capacité de stockage de la batterie,

le taux de charge/décharge, la température et la durée de vie.), des représentations très empirique du comportement de la batterie peuvent être établies. Le système de stockage utilisé dans notre installation est une batterie d'accumulateur au plomb [35]. C'est un modèle caractérisé par la mise en série d'une f.e.m avec une résistance variable, comme le montre la **Figure II-12**. Les caractéristiques de la source de tension E_b et la résistance interne R_b dépendent de la température.

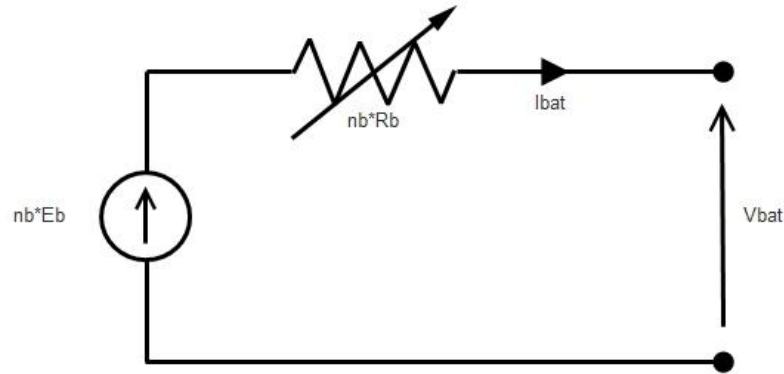


Figure II-12 : Schéma équivalent du modèle CIEMAT

Ce modèle définit la tension aux bornes de l'accumulateur en fonction du courant imposé, de son état de charge et de la température. Il tient compte du rendement faradique en charge pour calculer l'évolution de son état de charge et intègre la phase de dégazage (dégagement d'hydrogène).

$$I_{bat} = \frac{P_{bat}}{U_{bat}} \quad (II-56)$$

Pour ressortir les phénomènes physiques qui régissent le fonctionnement du système de stockage, par le biais de la capacité, il faudrait tenir compte de la température. C'est pourquoi, nous proposons le modèle de la capacité, donnant la quantité d'énergie qui peut être restituée en fonction du courant moyen de décharge, elle est donnée par l'équation (II-57).

$$\frac{C_{bat}}{C_{10}} = \frac{1.67}{1 + 0.67 \left(\frac{I}{I_{10}}\right)^{0.9}} (1 + 0.005\Delta T) \quad (II-57)$$

Le modèle de la capacité est établie à partir de l'expression du courant I_{10} , correspondant au régime de fonctionnement à C_{10} (C_{10} la capacité en Ah de la batterie en régime de décharge à courant constant I_{10} durant 10h: $C_{10} = 10 \cdot I_{10}$), dans lequel ΔT est l'échauffement de l'accumulateur (supposé identique pour tous les éléments) par rapport à une température ambiante qui est égale à 25 °C.

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (II-58)$$

Avec C_{bat} la capacité (Ah) nominale de la batterie et Q_d la quantité de charge manquante par rapport à C_{bat} .

Les expressions des grandeurs de la batterie sont exprimées ci-dessous.

L'expression générale de la tension batterie :

$$V_{bat} = n_b \cdot E_b + n_b \cdot R_b \cdot I_{bat} \quad (II-59)$$

V_{bat} : Tension de batterie.

I_{bat} : Courant de la batterie.

E_b : La force électromotrice fonction de l'état de charge de la batterie.

R_b : La résistance interne, variable en fonction de l'état de charge.

Les tensions en décharge et en charge sont modélisées par deux équations différentes :

✓ Tension en décharge :

$$V_{bat-d} = n_b \cdot [1.965 + 0.12 \cdot EDC] - n_b \cdot \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007 \cdot \Delta T) \quad (II-60)$$

✓ Tension en charge :

$$V_{bat-c} = n_b \cdot [2 + 0.16 \cdot EDC] + n_b \cdot \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \left(\frac{6}{1 + I_{bat}^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) \cdot (1 - 0.025 \cdot \Delta T) \quad (II-61)$$

➤ **Résistance de la batterie [41]**

La résistance interne de la batterie n'est pas une valeur constante, elle varie selon l'état de charge, la température et l'état de vieillissement. De façon générale, la résistance interne d'une batterie augmente quand l'état de charge croît. De même, pour un état de charge donné, la résistance interne d'une batterie augmente quand la batterie vieillit.

• **Résistance en décharge**

L'équation de la résistance de la batterie pendant la décharge est la suivante :

$$R_d = \frac{1}{C_{10}} \cdot \left(\frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007 \Delta T) \quad (II-62)$$

• **Résistance en charge**

Pendant la charge la résistance de la batterie est la suivante :

$$R_c = \frac{1}{C_{10}} \cdot \left(\frac{6}{1 + |I_{bat}|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025 \Delta T) \quad (II-63)$$

II.5.1 Simulation de la batterie modèle CIEMAT

II.5.1.1 Influence de la température sur la capacité

La température influence positivement sur la batterie ce qui fait augmenter sa capacité de stockage plus la température est chaude, la batterie offrira un stockage plus conséquent.

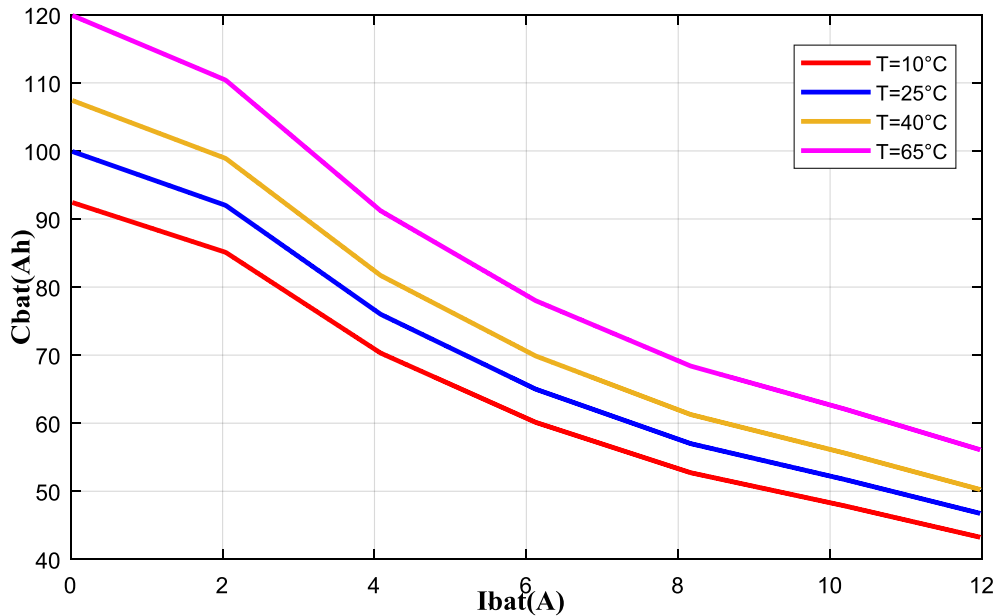


Figure II-13 : Influence de la température sur la capacité

II.5.1.2 Influence de la température sur l'état de charge de la batterie

On remarque qu'avec l'augmentation de la température, la capacité de la batterie en fonction de l'état de charge de la batterie, telle qu'à une température de 25°C, le EDC s'affiche presque 30% alors que pour $T = 80^{\circ}\text{C}$, il est presque de 50%.

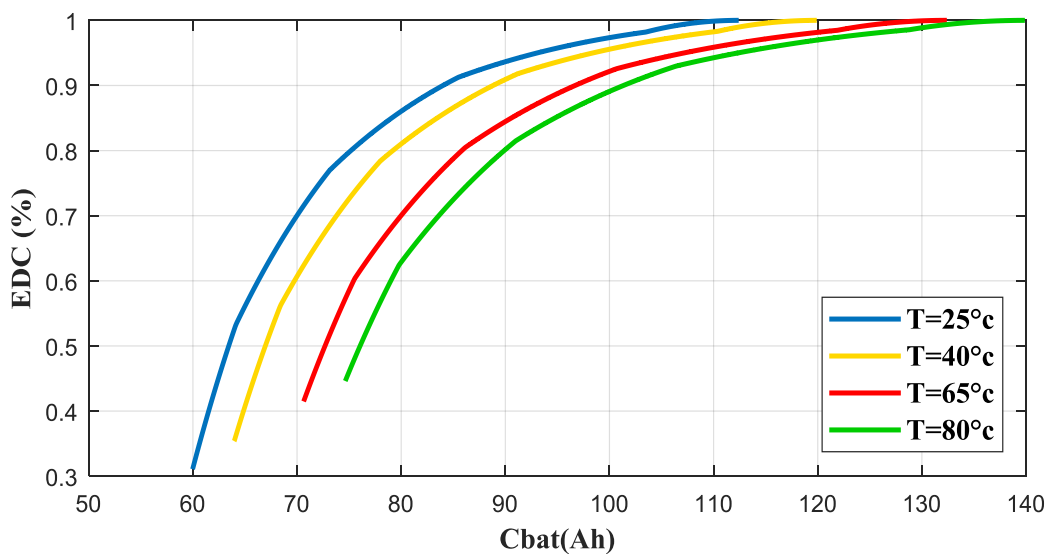


Figure II-14 : Influence de la température sur l'état de charge de la batterie

II.6 Optimisation du générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de tension. La caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ du générateur dépend de l'éclairement solaire (l'irradiation) et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un convertisseur statique commandé, permettant de rattraper à chaque fois le point de puissance maximale. Ces commandes connues sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) assurant le couplage entre le générateur photovoltaïque et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale [35].

II.6.1 La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking)

Par définition, une commande MPPT (maximum power point tracking), associé à un convertisseur DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quels que soit les conditions météorologiques (irradiation, température). Cette commande ainsi place le système au point de fonctionnement maximum (V_{pv-opt} , I_{pv-opt}). Le premier système de puissance MPPT a été introduit en 1968 pour un système spatial. Au cours des années, plusieurs algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés pour déterminer le point de puissance maximum [36].

II.6.1.1 Les méthodes directes

II.6.1.1.1 Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

C'est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité. Une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée (augmentée ou diminuée) avec une constante (C) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction. Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé [37].

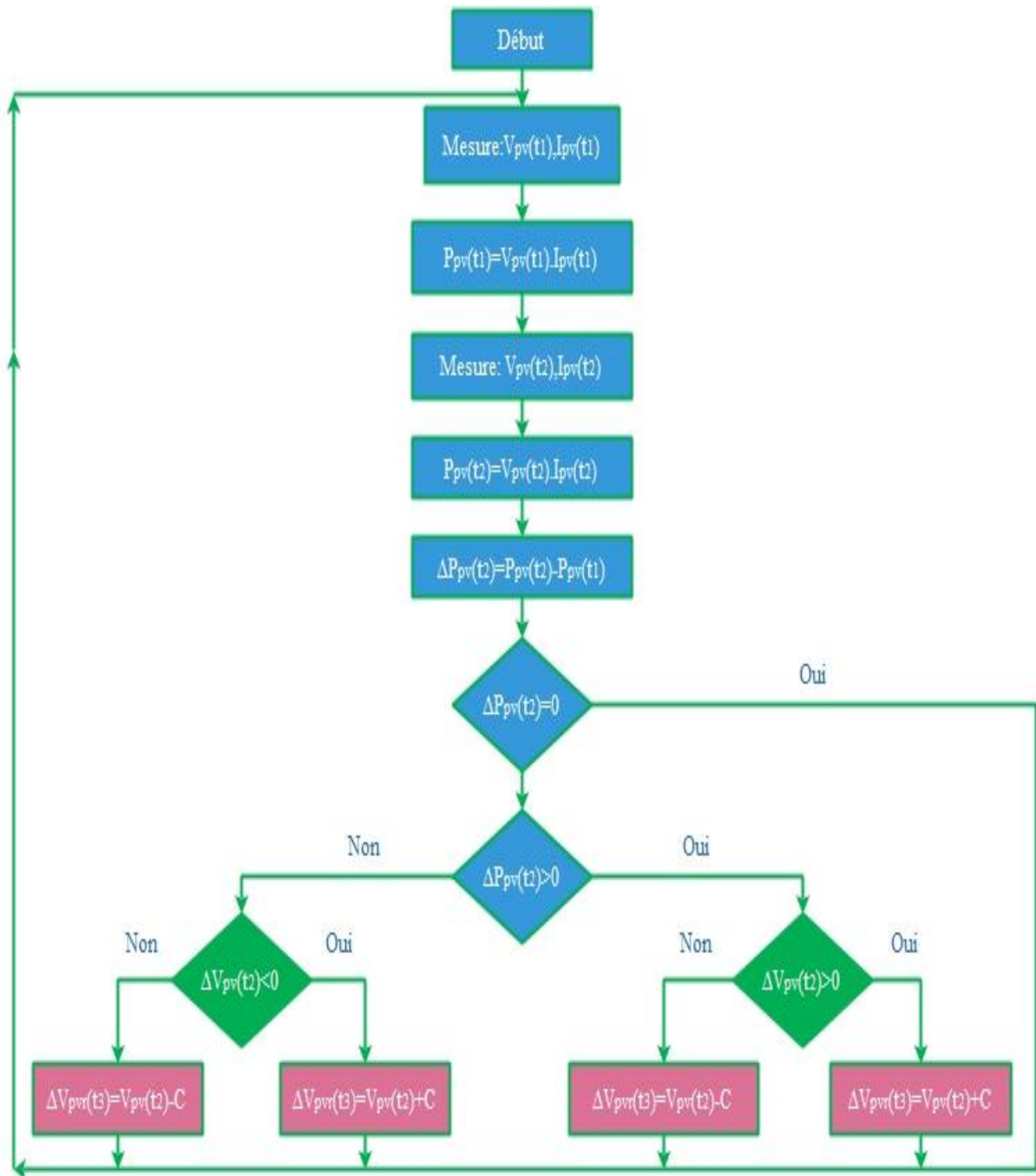


Figure II-15 : Organigramme de la méthode perturbation et observation (P&O)

Si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a déjà dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectuée lorsque la tension décroît, Voir la **Figure II-16**.

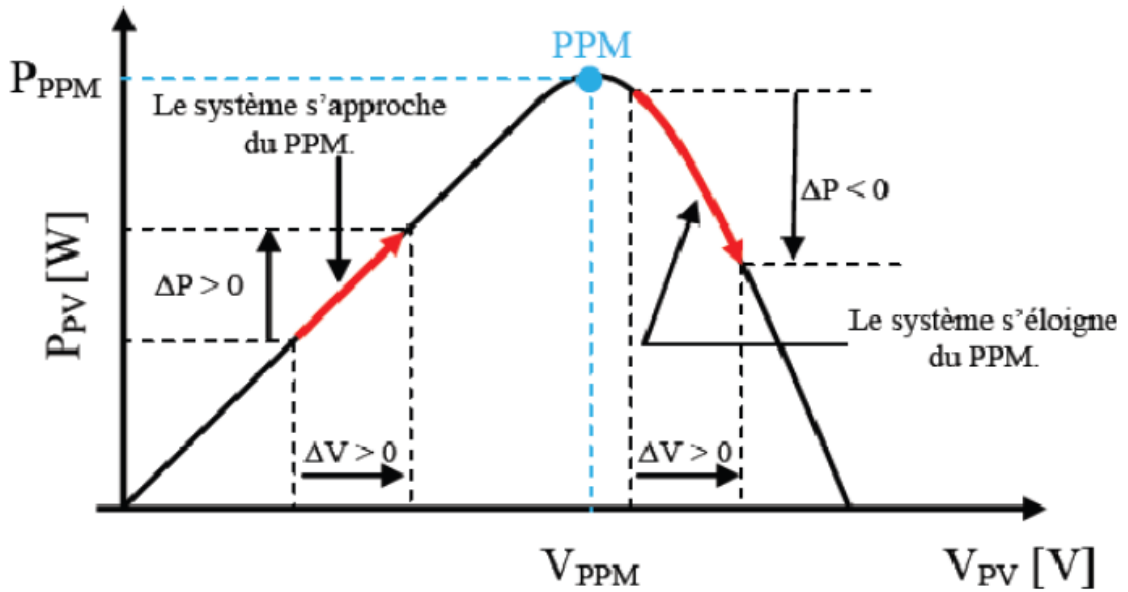


Figure II-16 : Caractéristiques d'un panneau solaire (principe de fonctionnement de (P&O))

II.6.1.1.2 Méthode de conductance incrémentielle (CI)

Cette méthode s'intéresse directement aux variations de la puissance en fonction de la tension.

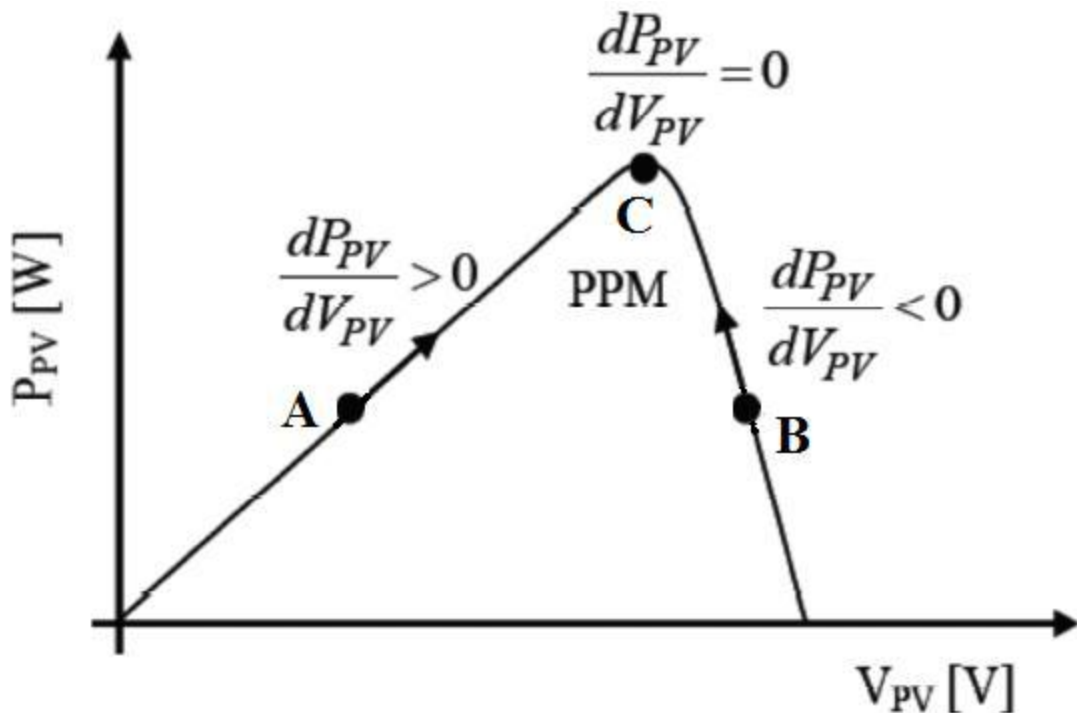


Figure II-17 : Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de dP/dV sur la caractéristique de la puissance

L'organigramme de l'algorithme est montré sur la **Figure (II-18)** :

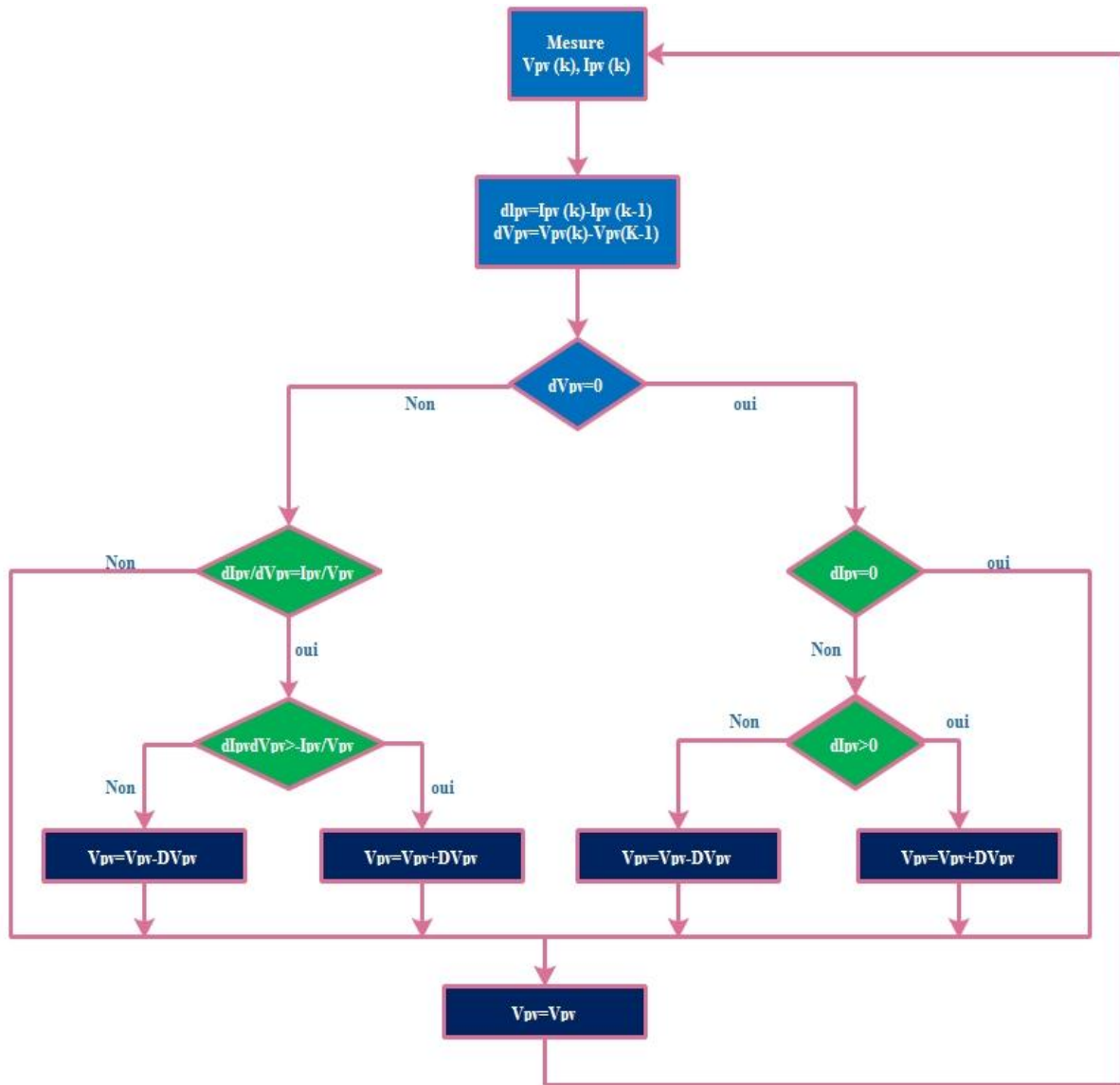


Figure II-18 : Organigramme de la méthode conductance incrémentielle (CI)

Le courant de sortie du panneau photovoltaïque et sa tension sont utilisés pour calculer la conductance et la conductance incrémentielle. Son principe consiste à comparer entre la conductance ($G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}}$) et de sa dérivée ($\Delta G = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$) et de décider quand augmenter ou diminuer la tension photovoltaïque afin d'atteindre le MPP où la dérivée de la puissance ($\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$). La méthode conductance incrémentielle est souvent jugée efficace de point de vu efficacité de recherche du point de puissance maximale [37]. Cependant, l'algorithme à implémenter est souvent complexe et nécessite une grande capacité de calcul, ce qui réduit la période de contrôle du système [35].

II.6.1.1.3 La méthode par mode de glissement

Etant un cas particulier de la commande à structure variable, la commande par modes glissants (CMG) a été largement utilisée dans la littérature. Ce succès est dû à sa simplicité de

mise en œuvre et à sa robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et des perturbations externes [35].

II.6.1.1.4 La commande par logique floue

Ces dernières années, les contrôleurs par logique floue (FLC) sont largement utilisés pour la recherche du MPP. Ces derniers sont indépendants du modèle du processus. Ils se caractérisent par leur aptitude à appréhender les problèmes de non linéarité et ils présentent des performances robustes par rapport aux variations des conditions atmosphériques [35].

Les règles floues permettent de déterminer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d'entrée. Elles relient le signal de sortie aux signaux d'entrée par des conditions linguistiques prenant en compte l'expérience ou le savoir-faire acquis par un opérateur humain, en traduisant simplement des remarques de bon sens [35]. Les étapes de calcul des différentes commandes sont les suivantes [38] :

✓ **Interface de fuzzification**

- Mesurer les valeurs numériques des variables d'entrées ;
- Les projeter dans l'univers de discours en utilisant un facteur d'échelle ;
- Transformer ces valeurs numériques en valeurs linguistiques en utilisant des fonctions d'appartenances qui ont pour but de subdiviser l'espace d'entrée de l'univers de discours en sous-ensembles flous.

✓ **Logique de prise de décision (moteur d'inférence)**

Ce bloc représente le noyau du contrôleur flou, qui est capable de simuler les décisions humaines basées sur le concept flou et d'inférer les actions de contrôle flou par intervention de l'implication floue et des règles d'inférence.

✓ **Défuzzification**

La défuzzification a pour but de :

- Transformer les valeurs de la sortie situées dans l'univers du discours en valeurs réelles comprises dans le domaine de variation ;
- Extraire de la sortie de vérité la valeur numérique de la sortie.

II.6.1.2 Les méthodes indirectes

II.6.1.2.1 Méthode de courant de court-circuit

Cette technique est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l'équation $I_{cc} = K_i I_{cc}$ où K_i est un facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.85 et 0.92. En effet, le point de fonctionnement optimal est obtenu en amenant le courant du panneau au courant optimal. Par conséquent, on change le rapport cyclique jusqu'à ce que le panneau atteigne la valeur optimale [39].

II.6.1.2.2 Méthode de tension en circuit ouvert

Cet algorithme est basé sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert et la tension optimale donnée par l'équation $V_{mpp} = K_v V_{co}$ où K_v est un facteur de tension

dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.73 et 0.8 [40]. Bien que cette méthode soit simple, il est difficile de choisir une valeur optimale de K_v .

II.6.1.2.3 Méthode de la table de consultation

Dans cette méthode, les valeurs mesurées de la tension et du courant photovoltaïque sont comparées à ceux stockés dans le système de commande, qui correspondent à ceux dans les conditions optimale de fonctionnement, sous des conditions climatique réelles. Cet algorithme nécessite une grande capacité de mémoire pour stockage des données et l'exécution doit être ajustée en fonction du panneau photovoltaïque utilisé, en plus, il est difficile d'enregistrer et de stocker toutes les conditions possibles de fonctionnement du système [39].

Dans nôtres travail, nous avons choisi le modèle d'optimisation P&O.

II.6.2 Applications et simulations de la méthode P&O sur un panneau photovoltaïque

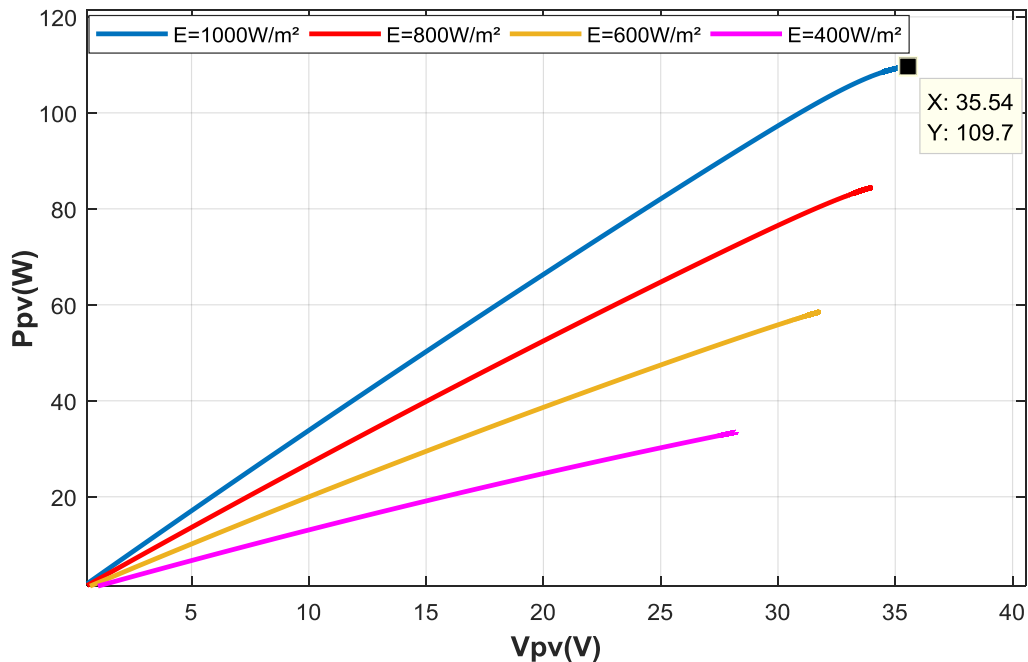


Figure II-19 : Influence de l'irradiation sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ avec optimisation

La tension croît lorsque l'irradiation augmente. Il en est de même pour la puissance maximale qui croît avec l'irradiation.

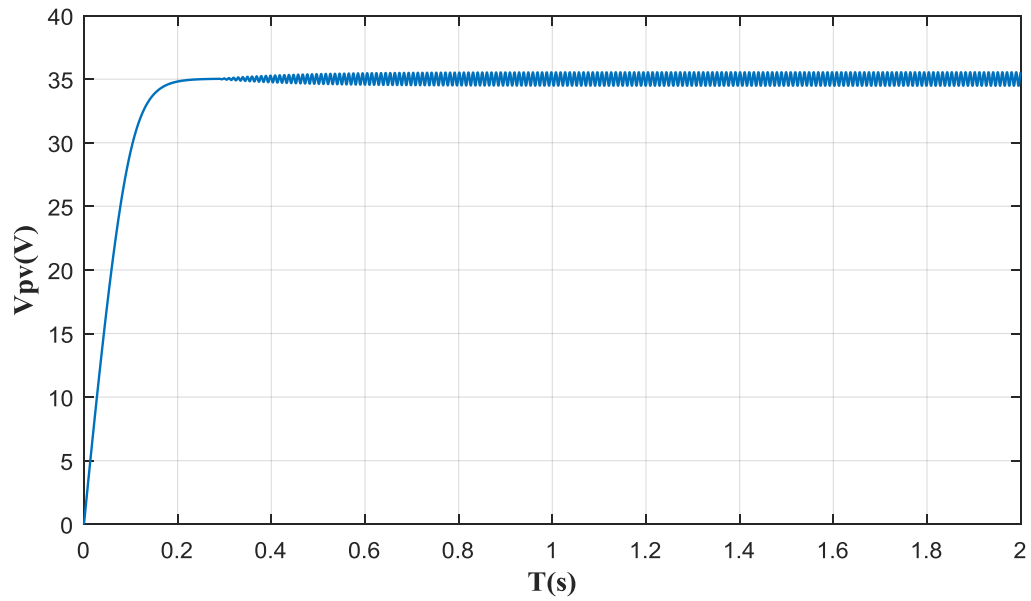


Figure II-20 : Allure de la tension du panneau photovoltaïque après l'application du la P&O

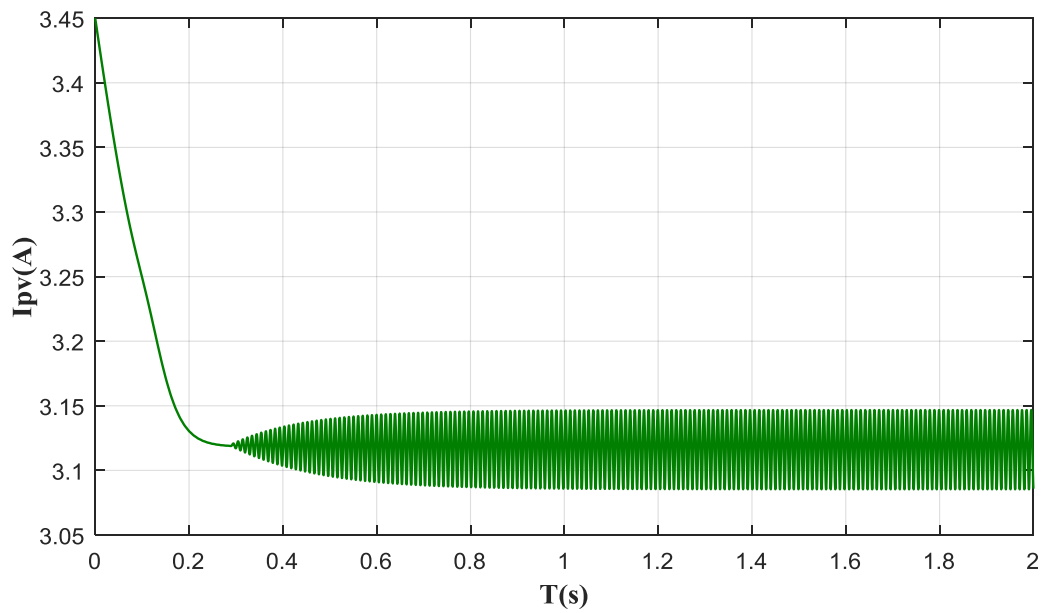


Figure II-21 : Allure du courant du panneau photovoltaïque après l'application du la P&O

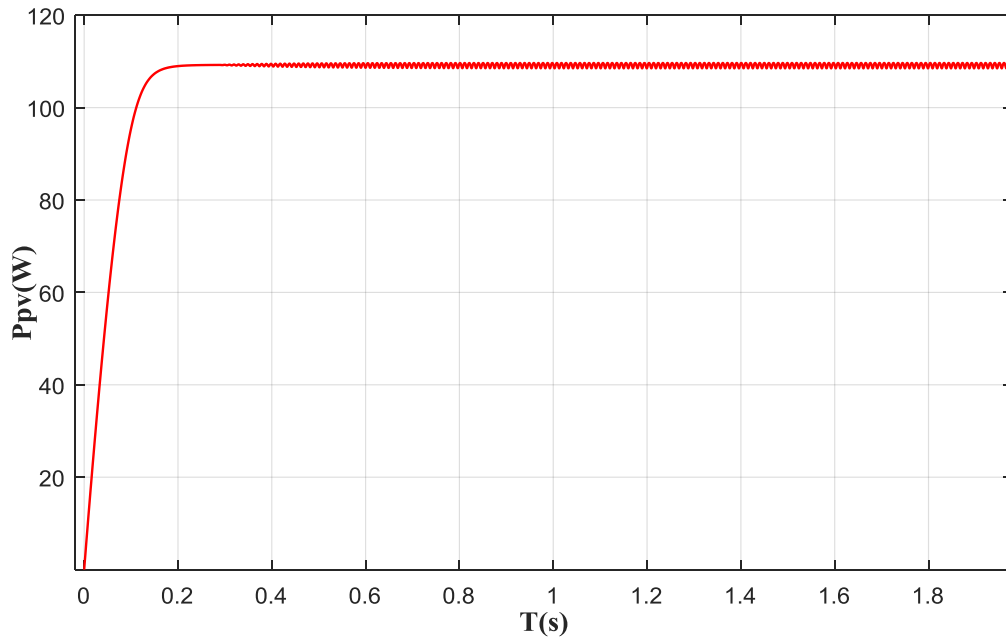


Figure II-22 : Allure de la puissance du panneau photovoltaïque après l'application de la P&O

Interprétation des résultats

D'après les résultats de simulations, on remarque bien que la tension converge vers le point de puissance maximal. Des **Figures (II-18), (II-19) et (II-20)**, on constate que la méthode de perturbation et d'observation (P&O) présente des oscillations en régime permanent suite à la perturbation continue de la tension de fonctionnement.

II.7 Conclusion

Dans les paragraphes qui précèdent, nous avons présenté les différentes méthodes de modélisations pour les éléments constituant un système de conversion d'énergie solaire photovoltaïque autonome. De plus, nous avons aussi déterminé pour les composants principaux (batteries et panneau PV), les caractéristiques essentielles ainsi que l'influence des données météorologique sur le comportement de chacun d'eux. Ensuite, nous avons présenté les méthodes d'optimisations du générateur PV pour une exploitation optimale en choisissant d'appliquer l'algorithme de la méthode "perturbation et observation" «P&O» car il présente une structure de régulation simple et peu de paramètres de mesure. Cette partie nous permettra d'appliquer les performances et d'optimiser le système global du projet à étudier dans le chapitre qui suit.

III.1 Introduction

Au cours du premier et du deuxième chapitre, nous avons prédéfini certaines théories relatives aux énergies renouvelables et nous avons cité et présenté de manière générale les différentes technologies mises au point pour répondre aux défis énergétiques actuels. Le but était de rassembler tous les éléments nécessaires au dimensionnement des systèmes solaires photovoltaïques. Durant ce chapitre, nous allons mettre en pratique ces énoncées afin de dimensionner un système en prenant comme exemple une infrastructure réelle et avec des données pratiques pour ensuite évaluer l'utilité et la possibilité de relier en énergie autonome un édifice de taille conséquente et de besoin énergétique important. A l'issue de ce chapitre, nous allons présenter une synthèse et mettre en avant nos remarques et nos constats puis finir par des perspectives résolutive.

III.2 Présentation de l'entreprise d'accueil

La EIRCET-ETS BMA est une entreprise d'Etude et d'Installation des Réseaux et des Centrales Electriques et Téléphoniques son siège est situé à Bouira. Elle offre une large gamme de services, relatifs aux deux secteurs de l'énergie et des technologies de l'information.

Leur expertise comprend plusieurs échelons de tension et plusieurs niveaux d'intensités (BT, HT, Courant forts et courants faibles), et ils jouissent de toute aisance de manipulation des matériaux télécoms (Cuivre, Coaxial et Fibre optique). L'équipe EIRCET est habituée avec plusieurs technologies, notamment Schneider, Siemens, Legrand, Merlin Gerin, ABB, Fermax, Nice, Videx, Shint, BMS, Energical, Condor et Solar. La politique de travail adoptée par institution est basée sur ce que dicte l'organigramme suivant :

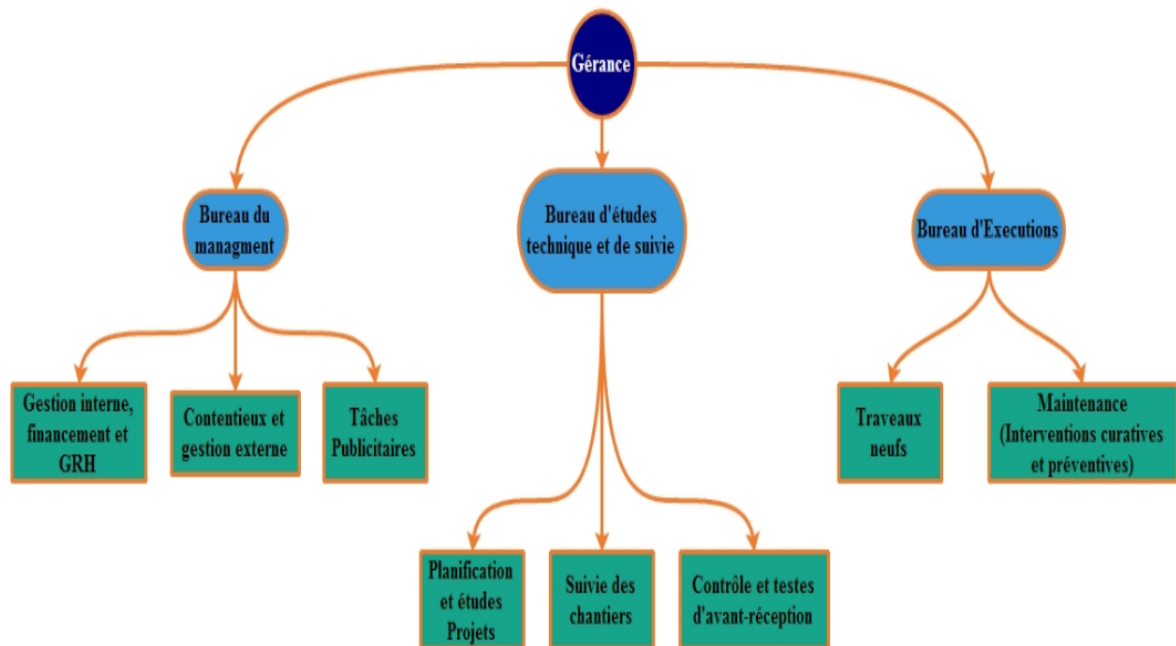


Figure III-1 : organigramme de l'entreprise

Bien que l'entreprise fût créée tardivement (en 2017), le staff technique est doté d'une expérience très large et très diversifiée dans le domaine et actuellement les principales activités dispensées sont présentées dans ce qui suit :

En énergie :

- Etude et réalisation des réseaux électriques industriels internes.
- Etude et dimensionnement des systèmes solaires photovoltaïques.
- Etude et installation des réseaux de mise à la terre et protection contre la foudre.
- Etude et confections des armoires et coffrets électriques.
- Installation des équipements des postes MT-BT et des batteries de condensateurs.
- Installation des lignes d'énergie aérienne et souterraines.
- Pose des câbles électriques et accessoires.
- Automatismes et Instrumentation.
- Rénovation et maintenance industrielle (Curative et Préventive).

En télécommunication :

- Etude et installation des armoires de télécommunication.
- Planification et dimensionnement des baies de brassage et câblage structuré.
- Téléphonie, réseaux informatiques.
- Tirage et pose des câbles de télécommunication (Cuivre, Coaxial et Fibre Optique). Tâches publicitaires.
- Soudure optique et certification.
- Localisation des défauts Optiques.
- Domotique.
- Sécurité et système de télésurveillances ...ETC

Pour ce qui est de la clientèle actuelle de l'entreprise, l'équipe compte quelques grandes sociétés en plus du secteur privé. On cite :

- Le MDN.
- SONELGAZ.
- ALGERIE TELECOM.
- BATIMETAL SPA.
- ERGOSOTS.
- ZY SYSTEMS.
- Hôpital psychiatrique de Sour El-ghouzlane.

III.3 Présentation du projet à étudier

Le projet des 50 bureaux porte en objet la réalisation d'une infrastructure à usage administratif, complémentaire pour le siège de la wilaya de Tindouf. Long de 128,69 m sur une largeur de 74m et de superficie totale de 9523,06 m², cet ouvrage serait implanté sur un

terrain de 10 264 m² situé en face et à quelques mètres du siège de la wilaya de Tindouf, au niveau de la nouvelle ville de Hassi Amar, Boulevard du Colonel Lotfi, avoisinant la maison de la culture, la direction du transport et le trésor publique.



Figure III-2 : situation géographique du projet des 50 bureaux Tindouf

L'édifice est réparti en plusieurs zones de parking, d'espaces verts et essentiellement d'un immeuble R+1, munis d'un petit sous-sol et comporte globalement des bureaux, des espaces de réunions, de réception et de détente, des locaux techniques et d'archivages et un espace destiné au chef de wilaya (Voir plan de masse en Annexe).

Plusieurs systèmes énergivores sont planifiés pour être installés dans ce projet et d'une vue générale, ils sont énumérés dans ce qui suit :

- Réseau d'éclairage externe.
- Réseau d'éclairage interne.
- Réseau d'alimentation des prises de courants.
- Réseau IT (Informatique et téléphonique).
- Réseau ondulé.
- Réseau de détection et de mise en sécurité incendie.
- Réseau de télésurveillance.
- Réseau d'alimentation des systèmes de climatisation centrale.
- Deux unités d'ascenseurs.

III.4 Bilan énergétique de l'immeuble

La procédure de dimensionnement doit commencer obligatoirement par le calcul du bilan énergétique total prévisionnel de l'infrastructure. Pour le faire, on doit confectionner un listing complet des équipements et appareillages qui consomment de l'énergie électrique.

Les listes des appareils planifiés pour ce projet sont présentées dans le tableau suivant. Ce dernier est prélevé à partir des devis quantitatifs dressés par le bureau d'études techniques chargé de réaliser l'étude de l'avant-projet :

Tableau III-1 : Bilan énergétique de l'immeuble

Code	Désignation	Puissance (kW)	Durée d'utilisation (Heurs)	Energie journalière (kWh/j)
1	Réseau d'éclairage intérieur	19,518	8	156,144
2	Alimentation des prises de courant	48,000	8	384,00
3	Réseau Informatique/Téléphonique	6,400	8	51,20
4	Alimentation des climatiseurs	63,800	5	315,00
5	Réseau de mise en sécurité incendie	4,000	0.2	0.80
		0,500	24	12,00
6	Système de télésurveillance	4,800	24	115.20
7	Eclairage Extérieur	16,260		
8	Bach à eau	8,000	4	32,00
9	Ascenseurs	16,000	1	16,00

P_{ch} (kW)	170,518	B_j (kWh/j)	966.344
----------------------------	----------------	------------------------------	----------------

Remarque : Dans le calcul de la puissance totale de l'installation et de l'énergie journalière de cette installation nous n'avons pas pris compte de la consommation de l'éclairage extérieur.

III.5 Orientation et inclinaison des panneaux solaire

On appelle orientation le point cardinal vers lequel est tournée la face active du panneau les panneaux photovoltaïques sont toujours orientés vers l'équateur et puisque dans notre cas on est à l'hémisphère nord donc l'orientation serait vers le sud.

Pour que les modules produisent un maximum d'énergie, il faut que les surfaces soient perpendiculaires aux rayons solaires, on doit donc incliner les modules pour qu'ils soient face au soleil.

L'inclinaison (*i*) des panneaux est donnée par la relation suivante :

$$i = \varphi - \text{Arc sin} \left[0.4 \sin \left(360 \frac{N}{365} \right) \right] \quad \text{(III-1)}$$

φ : La latitude du lieu ;

N : Le nombre de jours entre l'équinoxe de printemps (21 mars de chaque année) et le jour considéré, (de signe négatif vers la saison froide).

Mais il y a aussi une autre méthode plus simple pour définir l'inclinaison des panneaux en se référant à la relation entre la latitude et l'inclinaison des panneaux solaire donnée dans le **Tableau III-2** ci-dessous.

Tableau III-2 : Choix de l'inclinaison

Latitude	Inclinaison
$\varphi < 10^\circ$	$\alpha = 10^\circ$
$10^\circ < \varphi < 30^\circ$	$\alpha = \varphi$
$30^\circ < \varphi < 40^\circ$	$\alpha = \varphi + 10^\circ$
$\varphi > 40^\circ$	$\alpha = \varphi + 15^\circ$

Dans notre cas la latitude du site est de 27° nord dans le **Tableau III-2** l'inclinaison des panneaux est de $\alpha = \varphi$

Donc $\alpha = 27^\circ$

III.6 Les caractéristiques météorologique de Tindouf [42]

III.6.1 L'irradiation solaire

C'est la puissance du flux de rayonnement solaire moyen donné sur une année par unité de surface pour un site bien déterminé.

Le rayonnement solaire incident en ondes courtes quotidien moyen connaît une variation saisonnière considérable au cours de l'année.

La période la plus lumineuse de l'année dure 4,1 mois, du 10 avril au 13 août, avec un rayonnement solaire incident en ondes courtes par mètre carré supérieur à 7,3 kWh. Le jour le plus lumineux de l'année est le 12 juin, avec une moyenne de 8,2 kWh.

La période la plus sombre de l'année dure 2,9 mois, du 3 novembre au 1 février, avec un rayonnement solaire incident en ondes courtes par mètre carré inférieur à 4,8 kWh. Le jour le plus sombre de l'année est le 18 décembre, avec une moyenne de 3,9 kWh (*Figure III-2*).

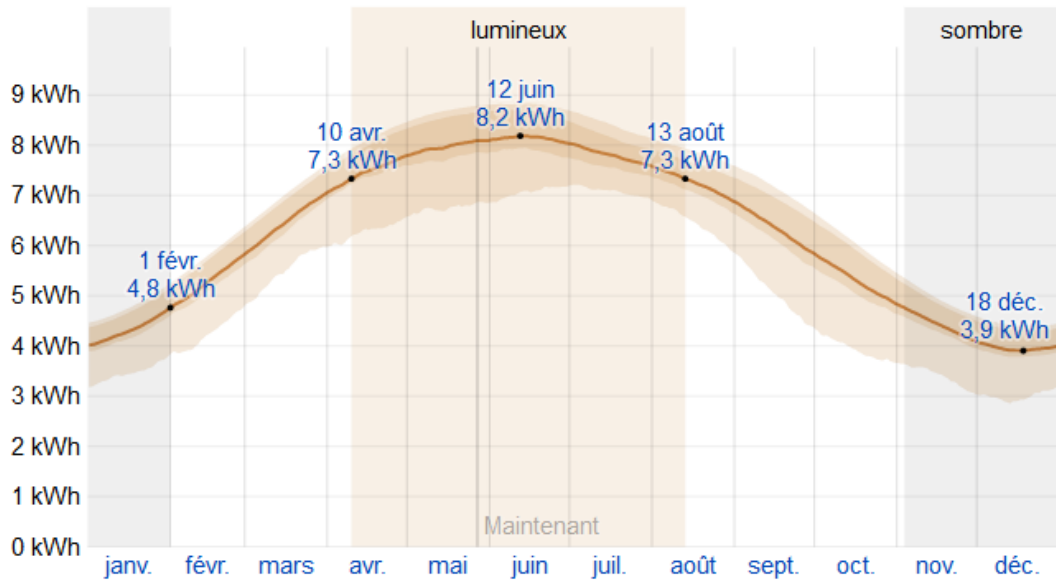


Figure III-2 :L'irradiation solaire annuelle donnée pour la région de Tindouf (2019)

L'irradiation moyenne annuelle est donnée par : $E=6.28 \text{ kWh/m}^2$.

III.6.2 Longueur du jour

La longueur du jour à Tindouf varie au cours de l'année. en 2019, le jour le plus court est le 22 décembre, avec 10 heures et 23 minutes de jour ; le jour le plus long est le 21 juin, avec 13 heures et 54 minutes de jour.

Le lever de soleil le plus tôt a lieu à 06:36 le 11 juin et le lever de soleil le plus tardif a lieu 1 heure et 48 minutes plus tard à 08:24 le 11 janvier. Le coucher de soleil le plus tôt a lieu à 18:37 le 1 décembre et le coucher de soleil le plus tardif a lieu 1 heure et 55 minutes plus tard à 20:32 le 1 juillet (*Figure III-3*).

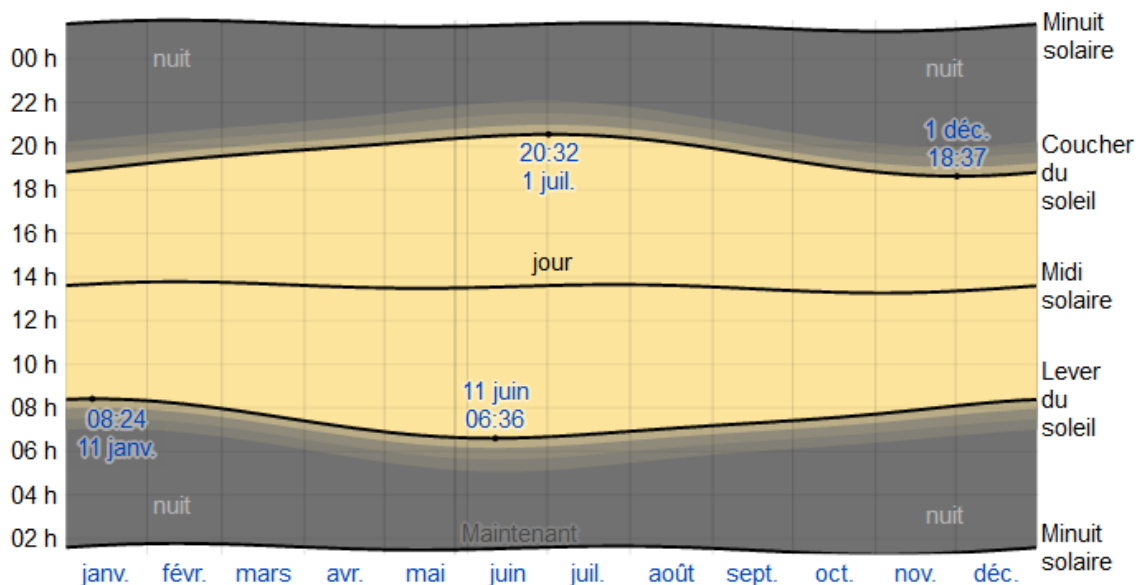


Figure III-3 : La variation de la longueur du jour sur une année à la région de Tindouf (2019)

III.6.3 Les températures

La saison très chaude dure 2,8 mois, du 17 juin au 10 septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale supérieure à 39 °C. Le jour le plus chaud de l'année est le 21 juillet, avec une température moyenne maximale de 43 °C et minimale de 28 °C.

La saison fraîche dure 3,2 mois, du 19 novembre au 24 février, avec une température quotidienne moyenne maximale inférieure à 25 °C. Le jour le plus froid de l'année est le 10 janvier, avec une température moyenne minimale de 7 °C et maximale de 20 °C.

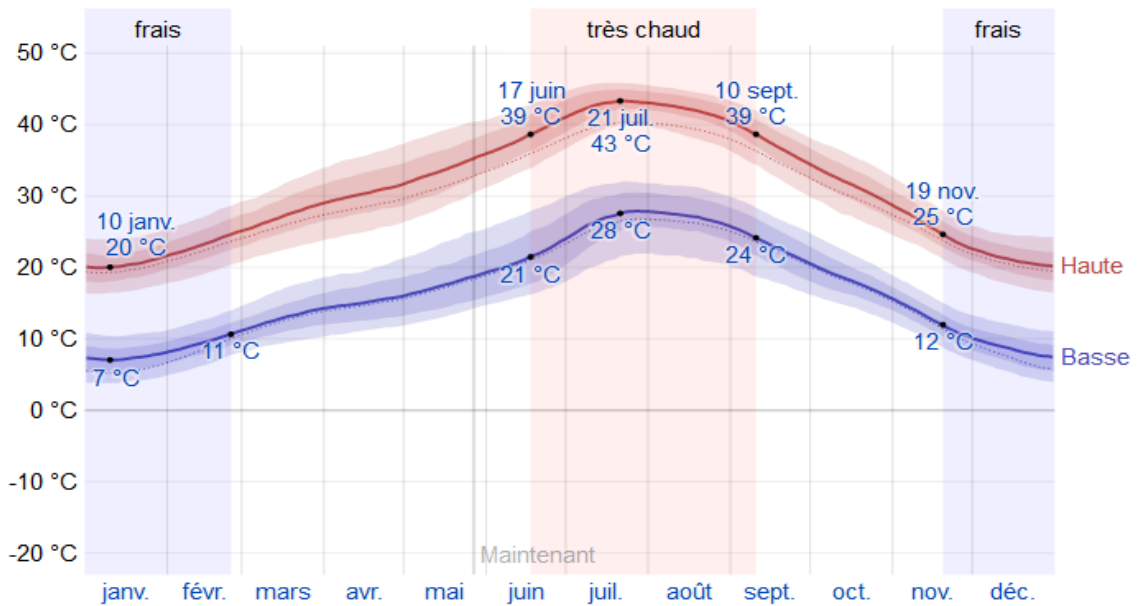


Figure III-4 : La variation de température au court de l'année pour la région de Tindouf (2019)

III.7 Dimensionnement du système d'alimentation à base d'énergie photovoltaïque

III.7.1 Le générateur photovoltaïque [43]

III.7.1.1 Bilan de puissance de l'installation

Le besoin journalier d'un structure est donnée par l'équation (III-2) qu'est la puissance de charge multiplie fois le temps d'utilisation de chaque élément électrifié.

$$B_j = \sum_1^x P_{ch} \Delta t \quad (III-2)$$

P_{ch} : Puissance de charge.

III.7.1.2 Puissance du générateur photovoltaïque

La puissance crête totale du GPV, dépend de l'irradiation quotidienne du lieu d'utilisation.

$$P_{Gpv} = \frac{B_j}{N_e k_c} \quad (III-3)$$

Avec :

$$N_e = \frac{G_s}{1000} \quad (III-4)$$

G_s : Valeur de l'ensoleillement moyenne annuelle.

N_e : Nombre d'heure équivalent.

P_c : Puissance crête du panneau choisi.

K_c : Le coefficient correcteur.

Le coefficient k_c vari selon ;

- l'incertitude météorologique.
- L'incertitude non corrigée des modules suivant les saisons.
- Le point de fonctionnement des modules qui est rarement optimal et qui peut être aggravé par la baisse des caractéristiques des modules, les pertes dans les raccordements, s'accumulent avec le temps (vieillessement et salissure).
- Le rendement du régulateur qui est généralement égale à ; 0.95.
- Le rendement de charge et décharge de la batterie ; 0.8 à 0.9.
- Les pertes dans les câbles de connexion.

Sa valeur théorique est comprise entre 0.55 et 0.75, mais en pratique la moyenne utilisée pour le système avec batterie est de 0.65.

III.7.1.3 Détermination du nombre de modules à installer

- Nombre de PV totale de captage :

$$N_{pv,T} = \frac{P_{Gpv}}{P_{pv}} \quad (III-5)$$

P_{Gpv} : Puissance crête de l'installation.

P_{pv} : Puissance crête unitaire.

- Nombre de panneau connectés en série :

$$N_s = \frac{V_{reg}}{V_{pv,u}} \quad (III-6)$$

V_{reg} : Tension maximale d'entre du régulateur.

$V_{pv,u}$: Tension nominale unitaire.

- Nombre de PV parallèle :

$$N_p = \frac{N_{pv,T}}{N_s} \quad (III-7)$$

- Calcul de la surface totale de l'installation :

$$S_{Tot} = S_{pv,u} N_{pv,T} \quad (III-8)$$

$S_{pv,u}$: Surface d'un panneau.

III.7.2 Dimensionnement des batteries [43]

- **Calcul de la capacité des batteries C_{batt} :**

$$C_{batt} = \frac{B_j J_{aut}}{V_{batt} DOD \eta_{batt}} \quad (III-9)$$

J_{aut} : Nombre de jour d'autonomes 3 jours.

V_{batt} : Tension de la batterie.

η_{batt} : Rendement de la batterie 95%.

DOD : Taux de charge de la batterie 60%.

- **Calcul du nombre de batteries N_{batt} :**

$$N_{batt} = \frac{C_{batt}}{C_{batt,u}} \quad (III-10)$$

$C_{batt,u}$: Capacité de la batterie unitaire.

- **Nombre de batterie série :**

$$N_{batt,s} = \frac{V_{pv,u}}{V_{batt}} \quad (III-11)$$

$V_{pv,u}$: Tension du panneau PV.

- **Nombre de batterie en parallèle :**

$$N_{batt,p} = \frac{N_{batt}}{N_{batt,s}} \quad (III-12)$$

III.7.3 Dimensionnement de l'onduleur [43]

$$P_{c,est} = N_{pv,T} P_c \quad (III-13)$$

$P_{c,est}$: Puissance crêt estime.

$$P_{ond,est} = P_{c,est} [0.9 - 0.95] \quad (III-14)$$

$P_{ond,est}$: Puissance de l'onduleur estime.

III.7.4 Dimensionnement du câblage [43]

➤ **Côté courant continu (DC)**

$$S = \frac{\rho L I}{\varepsilon V} \quad (\text{III-15})$$

S : Section du câble.

ρ : Résistivité du matériau $1.851 \times 10^{-8} \Omega \cdot m = 0.0185 \Omega \cdot mm^2/m$.

ε : Chute de tension.

I: Courant admissible dans le câble.

L : Longueur du câble.

Afin d'éviter les phénomènes de surcharge des câblages.

$$I > I_{max} \quad (\text{III-16})$$

$$I_{max} = 1.25 I_{cc} \quad (\text{III-17})$$

I_{cc} : Courant du court-circuit du PV.

Si on a deux chaînes

$$I > 2 I_{max} \quad (\text{III-18})$$

➤ **Entre les panneaux photovoltaïques et la boîte de raccordement**

$$I = 1.25 I_{cc} \quad (\text{III-19})$$

➤ **Entre la boîte de raccordement et le régulateur DC/DC**

$$I = I_{mpp} N_{pv} \quad (\text{III-20})$$

➤ **Entre les câbles courant-continu et la batterie**

$$V_{batt} = V_{batt,u} N_{batt,s} \quad (\text{III-21})$$

$$1 - \alpha = \frac{V_{batt}}{V_{pv}} \quad (\text{III-22})$$

$$1 - \alpha = \frac{I}{I_{batt}} \rightarrow I_{batt} = \frac{I}{(1 - \alpha)} \quad (\text{III-23})$$

$$S = \frac{\rho L I_{batt}}{\varepsilon V} \quad (\text{III-24})$$

➤ **Côté alternatif (AC)**

$$I_B = \frac{P_{ch}}{3V} \quad (\text{III-25})$$

$$\Delta V = b\varphi \frac{L}{S} \cos\varphi \quad (\text{III-26})$$

$$S = b\varphi \frac{L}{\Delta V} \cos\varphi I_B \quad (\text{III-27})$$

Cos φ : Déphasage 0.86.

V=VN Tension nominal.

I_B : Courant maximal d'emploi.

B : un coefficient égal à 1 en triphasé et à 2 en monophasé.

Après avoir calculé les sections des conducteurs analytiquement, le choix final doit être prît selon les normes correspondantes, tout en prenons compte des facteurs technico-économique et de la disponibilité commerciale.

III.7.5 Application numérique

Dans cette étude de dimensionnement d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec stockage nous avons choisi de travailler avec les éléments suivants :

- Panneau photovoltaïque CEM320M-72 *Condor* (Annexe 4).
- Batterie CGB 12-260R *Condor*.
- Régulateur charge avec MPPT SDC480V-200A *Sandi* (Annexe 5).
- Onduleur *Kaco New Energy Poward XP 200-HV* (Annexe 6).
- Boite de jonction *ABB* (Annexe 7).

Voir en annexes pour les caractéristiques techniques des équipements choisi pour notre système PV.

Tableau III-3 : Dimensionnement du GPV

$B_j = \sum_1^x P_{ch} \Delta t$	966.344kWh/j
$N_e = \frac{G_s}{1000}$	6.28h
$P_{Gpv} = \frac{B_j}{N_e k}$	236.732kWc
$N_{pv,T} = \frac{P_{Gpv}}{P_{pv,u}}$	740
$S_{Tot} = S_{pv,u} N_{pv,T}$	1443 m ²

Vu la taille de générateur photovoltaïque on le divise en deux sous-système équivalant de 118.366kWc chaque un.

Tableau III-4 : Dimensionnement du sous générateur PV

P_{Gpv1}	118.366kWc
$N_{pv,T1} = \frac{P_{Gpv1}}{P_{pv,u}}$	370
$N_s = \frac{V_{dc}}{V_{pv,u}}$	23
$N_p = \frac{N_{pv,T}}{N_s}$	16
$S_{Tot} = S_{pv,u} N_{pv,T1}$	717.6 m ²

Pour la consommation nocturne la charge qui a été retenue a été calculée uniquement pour les récepteurs suivant **Tableau (III-5)**.

Tableau III-5 : Bilan énergétique de l'immeuble pendant la nuit

Code	Désignation	Puissance (kW)	Durée d'utilisation (Heurs)	Energie journalière (kWh/j)
1	Réseau d'éclairage intérieur (50%)	9,759	8	78,072
2	Alimentation des prises de courant	5,000	8	40
3	Réseau Informatique/Téléphonique	-	-	-
4	Alimentation des climatiseurs (2x12000+18000)	3,500	8	28
5	Réseau de mise en sécurité incendie	4,000	8	12
6	Système de télésurveillance	4,800	24	115.20
7	Eclairage Extérieur	-	-	-
8	Bach à eau	1,000	8	8
9	Ascenseurs	-	-	-

P_{ch} (kW)	170,518	B_j (kWh/j)	281,272
----------------------------	----------------	------------------------------	----------------

Tableau III-6 : Dimensionnement du système de stockage

$C_{batt} = \frac{B_j J_{aut}}{V_{batt} DOD \eta_{batt}}$	123364.9123Ah
$N_{batt} = \frac{C_{batt}}{C_{batt,u}}$	474
$N_{batt,s} = \frac{V_{reg}}{V_{batt}}$	40
$N_{batt,p} = \frac{N_{batt}}{N_{batt,s}}$	12

Pour le choix de l'onduleur on a :

Tableau III-7 : Dimensionnement de l'onduleur

$N_{pv,T} = N_{pv,T1} \times 2$	768
$P_{c,est} = N_{pv,T} P_c$	245.760kWc
$P_{ond,est} = P_{c,est} [0.9 - 0.95]$	221kW – 234kW

III.8 Gestion du système de production d'énergie [24]

L'algorithme de gestion d'énergie a pour rôle de contrôler tous les échanges énergétique entre les différents composants constatant le système, de production et de consommation, c'est-à-dire entre la production des panneaux photovoltaïque, les batteries et aussi la charge. Egalement pour garantir une cyclabilité de la batterie plus prometteuse en régularisant le processus de charge/décharge.

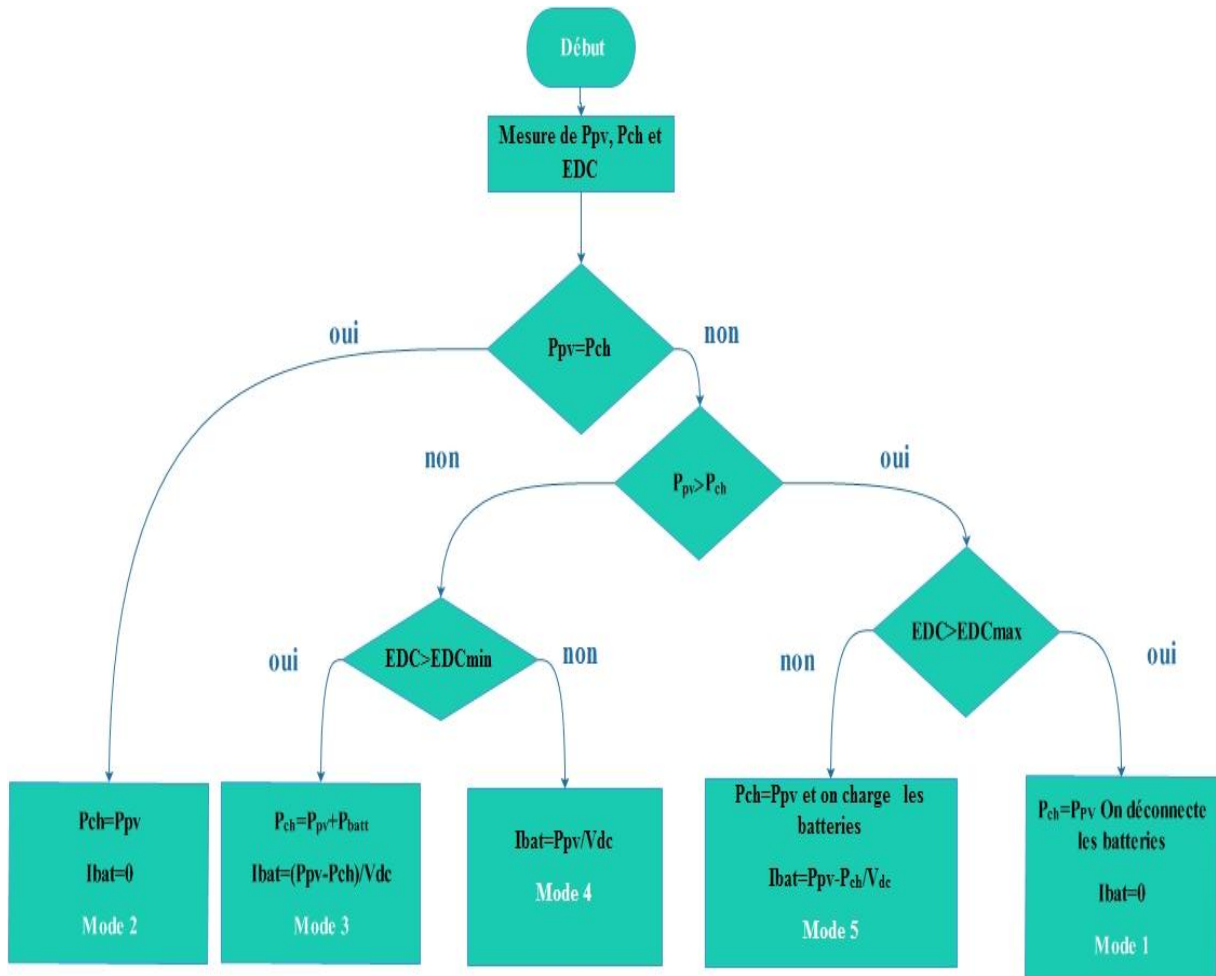


Figure III-5 : Diagramme de gestion d'un système PV avec batteries

➤ Les modes fonctionnels

Mode 1 : Quand la puissance PV est supérieur à la puissance demandée par la charge et que l'état de charge de la batterie est supérieur à EDCmax, on déconnecte la batterie et la charge sera alimentée par le générateur éolien, et le surplus d'énergie sera dirigé vers une résistance de délestage.

Mode 2 : Quand la puissance fournie par le générateur photovoltaïque est égale à la puissance demandée par la charge, ce qui va conduire à l'alimentation directe de la charge.

Mode 3 : Dans ce cas, la puissance PV est inférieure à la puissance demandée par la charge, donc le manque de puissance sera compensé par la batterie étant donné que l'état de charge de la batterie est supérieur à EDCmin

Mode 4 : Ce cas représente la situation où la puissance PV est insuffisante pour alimenter la charge, et l'état de charge de la batterie est inférieur à EDCmin, donc on déconnecte la batterie, et vu que la demande de la charge n'est pas satisfaite, cette dernière va aussi se déconnecter, dès que cela arrive la batterie se reconnecte à nouveau pour emmagasiner le peu d'énergie disponible.

Mode 5 : Quand la puissance PV est supérieur à la puissance demandée par la charge, et que l'état de charge de la batterie est inférieur à EDC_{max} , on alimente la charge et on charge la batterie.

III.9 Simulation du système globale

Dans ce qui suit nous avons simulé pour un système de production photovoltaïque avec un régulateur MPPT et un gestionnaire d'énergie.

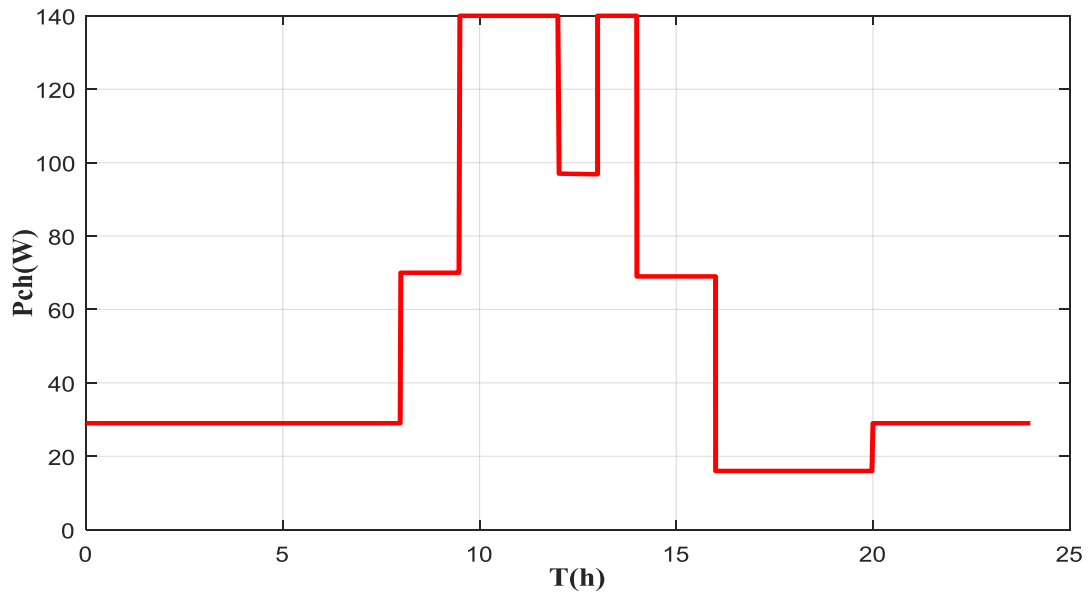


Figure III-6 : Profile de charge

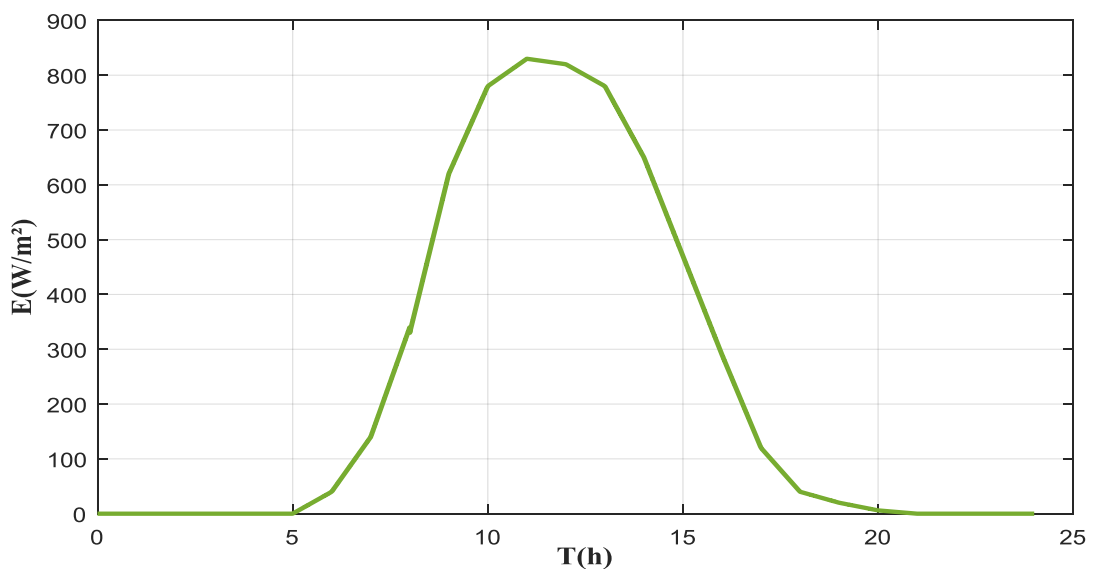


Figure III-7 : Profile d'irradiation d'une journée dans la région de Tindouf

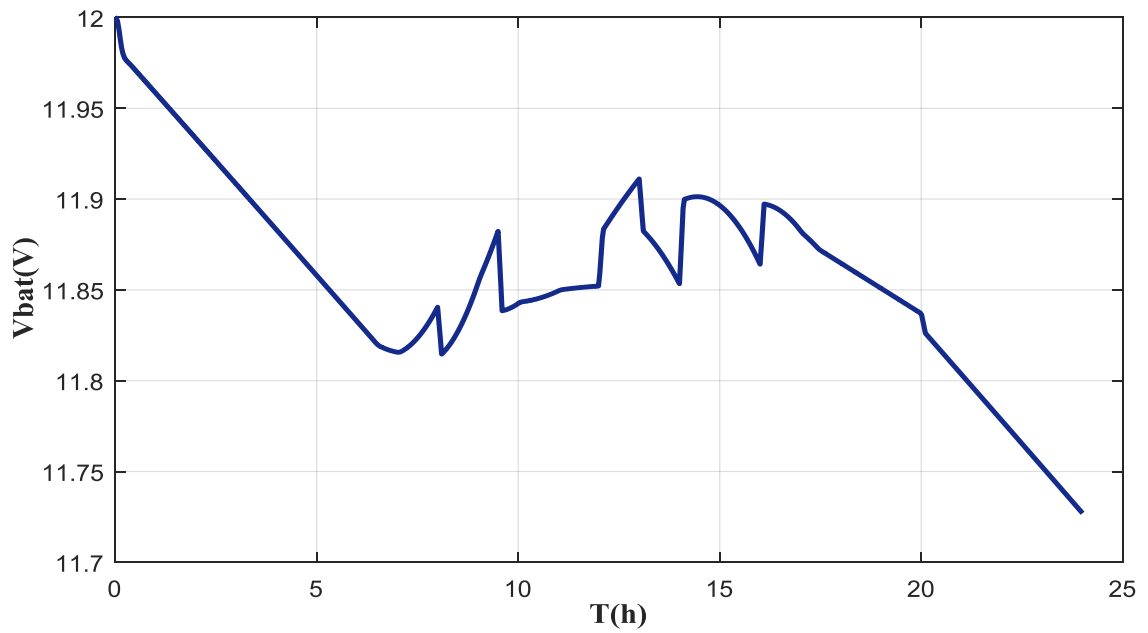


Figure III-8 : Tension de la batterie

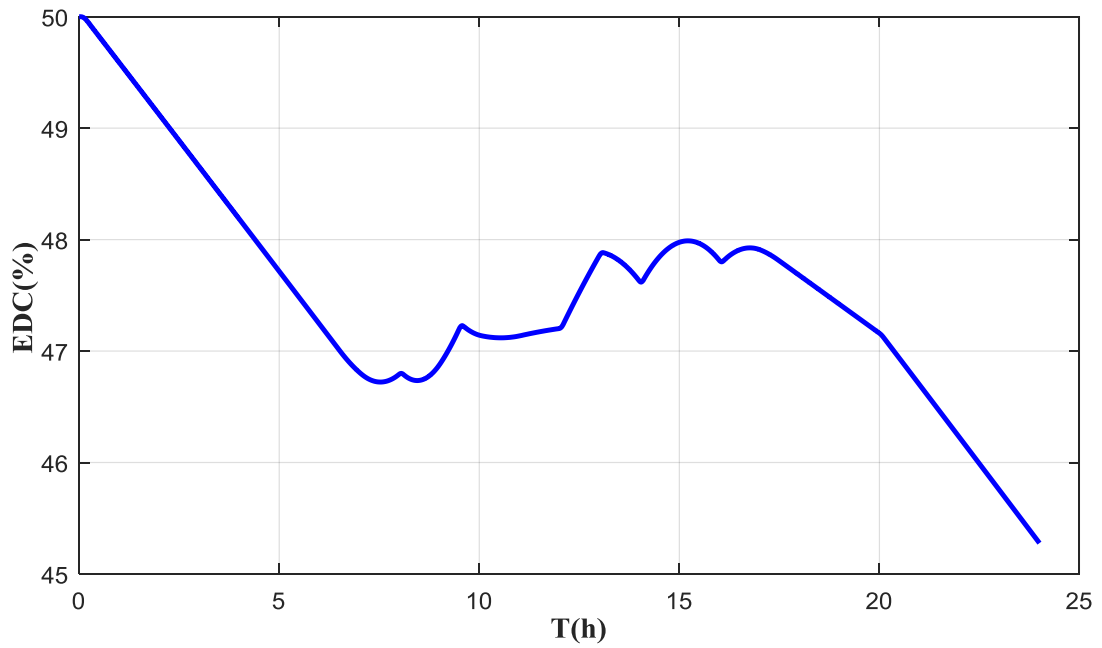


Figure III-9 : Etat de charge de la batterie

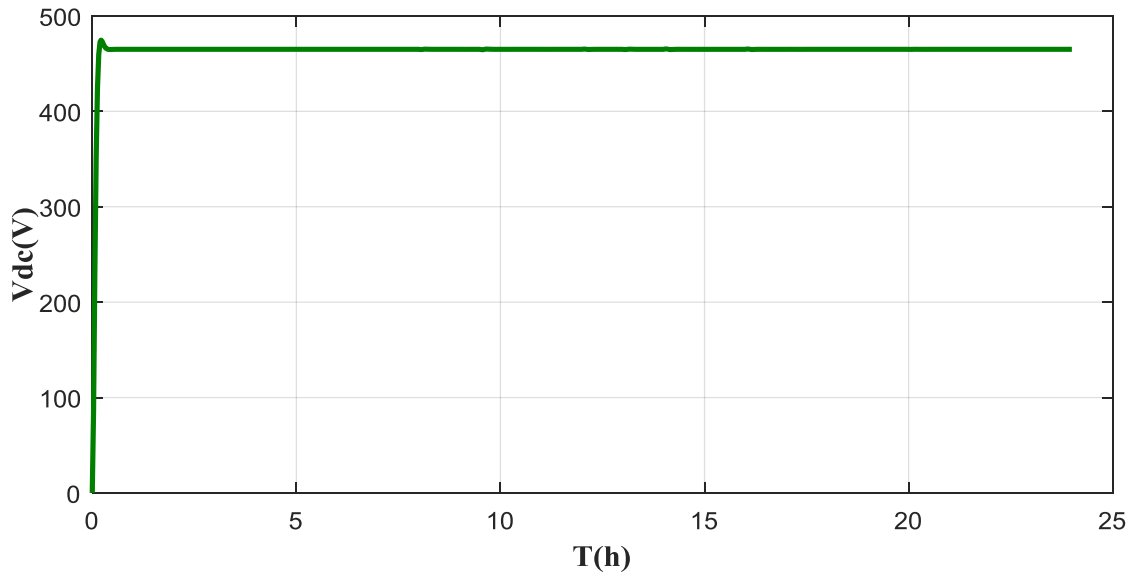


Figure III-10 : Tension du bus continu à la sortie du redresseur

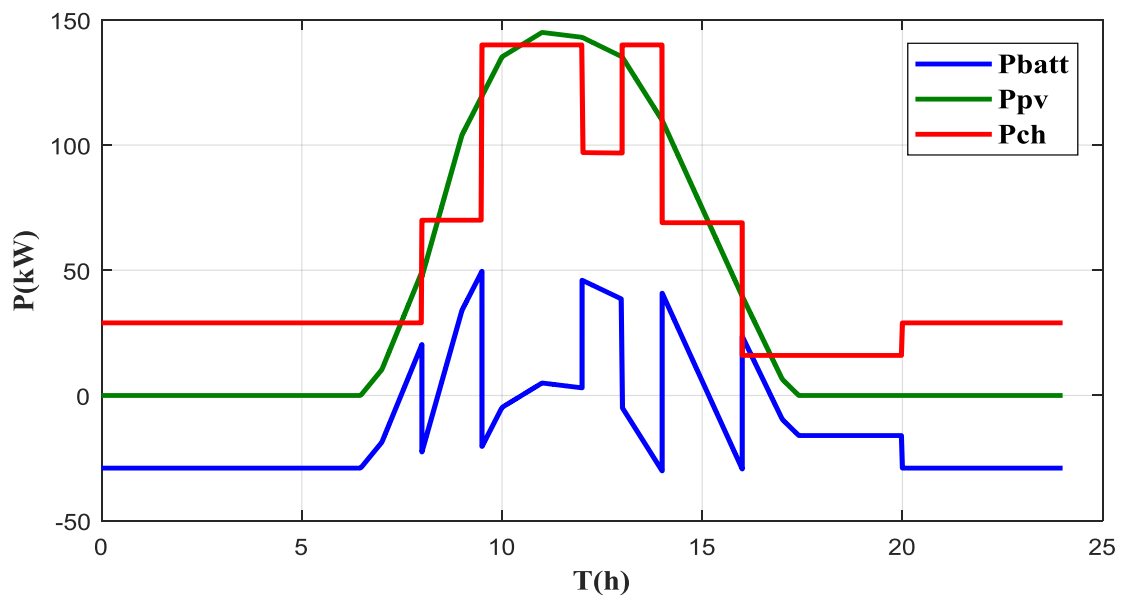


Figure III-11 : Allure des puissances (photovoltaïque, batteries et charge) après la gestion

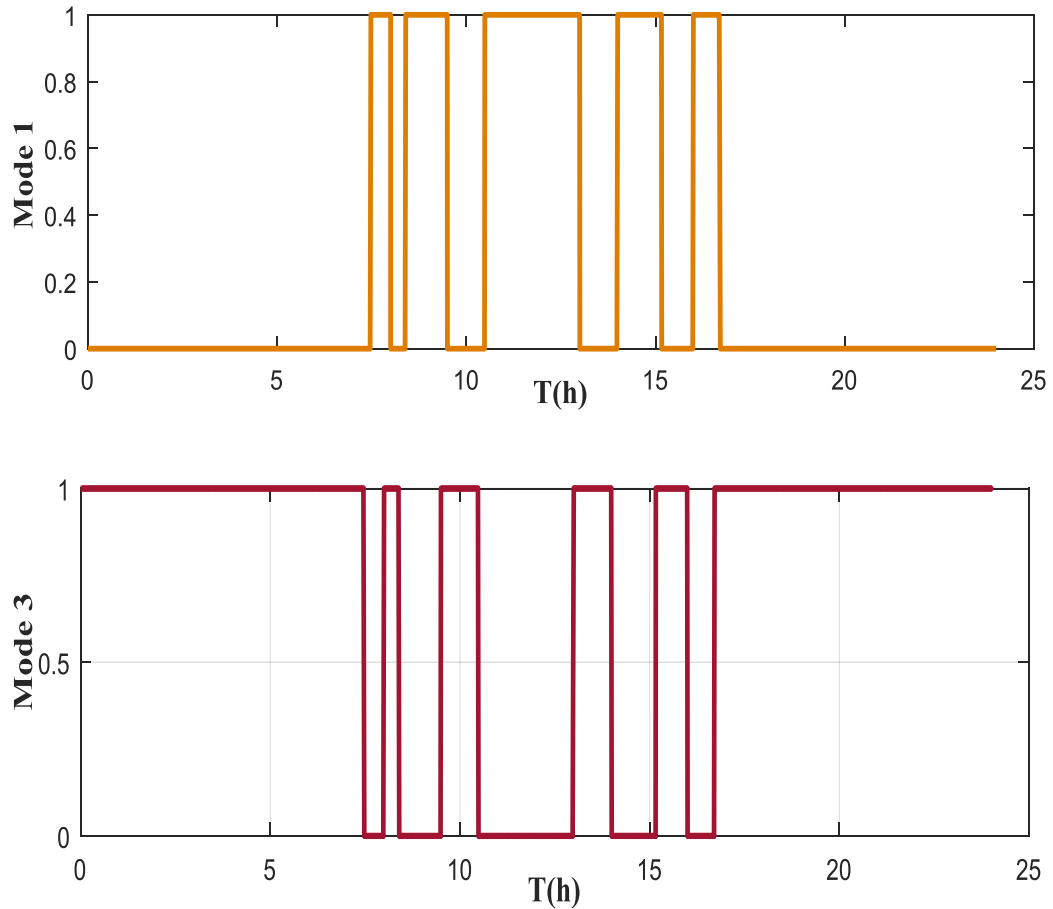


Figure III-12 : Modes de fonctionnement

Interprétation des résultats de simulation

De la **Figure (III-4)** et la **Figure (III-5)** : On constate que l'allure de la tension aux bornes de la batterie $V_{batt}(T)$ ainsi que celle de l'état de charge $EDC(T)$ évolue de la même manière. Donc l'EDC est l'image de la tension.

De la **Figure (III-6)** : Nous remarquons que la tension du bus continu est maintenue constante et ce quelles que soient la variation de la vitesse de l'irradiation solaire.

De la **Figure (III-7)** : Nous observant la complémentarité entre la production photovoltaïque et la décharge de la batterie afin d'alimenter la charge.

Des **Figures (III-3)** et **(III-7)** obtenus on remarque que la puissance photovoltaïque suit le profil d'ensoleillement.

III.10 Etude d'impact environnement

L'évaluation de la quantité de CO_2 évitée en utilisant cette source d'énergie renouvelable dans ce projet montrera l'impact positif du projet sur l'environnement.

La formule suivante sera utilisée pour calculer la quantité de CO_2 évitée en produisant une quantité d'énergie E [44].

$$m_{CO_2} = (\text{Densité du gasoil} \times \text{Teneur en carbone du gasoil} \\ \times \text{Consommation spécifique du moteur thermique} \\ \times B_j \times 44) / 12 \quad (\text{III-15})$$

Densité du gasoil : 0,83 kg / dm³ ;

Teneur en carbone du gasoil = 83,6 % ;

Consommation spécifique du moteur thermique = 0,17 l / kWh

$$m_{CO_2} = \frac{0.83 \times 0.836 \times 0.17 \times 966.344 \times 365 \times 44}{12} = 152556.01 \text{ kg/an}$$

$m_{CO_2} = 152.556$ tonnes/an

III.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé une nouvelle installation photovoltaïque avec stockage pour un fonctionnement en autonome d'énergie pour un édifice public. Nous avons dimensionné les différents composants de l'installation photovoltaïque à savoir les panneaux photovoltaïques, les batteries, le régulateur et l'onduleur. Nous avons suggéré un système de gestion de manière à ce que nous protégions notre système de stockage contre les surcharges et les décharges profondes.

Enfin nous avons donné une estimation de la quantité de CO₂ pour une même production électrique photovoltaïque mais avec le gasoil. Effectivement, nous avons pu diminuer la quantité de gaz à effet de serre que nous estimons étant un point très important en vue de promouvoir les énergies renouvelables.

Conclusion générale

L'objectif de notre travail était de dimensionner une installation pour approvisionner un établissement administratif publique à forte demande d'électricité. Nous avons durant notre mission, commencé par la présentation de certaines généralités sur les énergies renouvelables et nous avons mis en avant le cas du système solaire photovoltaïque. Ensuite nous avons réalisé la modélisation nécessaire à notre système pour prendre compte des caractéristiques physiques des éléments qui constitue notre système PV. Et vers la fin nous avons fait les calculs nécessaires aux dimensionnement d'une mini centrale solaire photovoltaïque.

Cette mini centrale est donc constituée de 740 panneaux solaires photovoltaïques de 320 Wc, de tension maximale de 38,06 V et qui génèrent un courant de 8.51 A chacun. Pour des raisons de disponibilité commerciale de certains équipements (Onduleurs, régulateurs de charge à MPPT) et afin de simplifier notre procédure de dimensionnement, nous avons divisé la mini centrale en deux sous systèmes de mêmes capacités et automatiquement nous avons déterminé les calibres nécessaires pour uniquement la moitié de notre générateur. Le sous générateur PV est constitué de 16 strings de 23 panneaux chacun et débite 117,76 kWc de puissance et de 875,38 V de tension d'entrée du régulateur de charge à MPPT.

Pour ce qui est du stockage, le nombre de batteries est de 474 de 12 Vcc et de 260 Ah. Nous avons mis 40 batterie en série à fin d'avoir 480 V que représente la tension de charge du régulateur.

Les deux sous systèmes sont interconnectés à travers leurs régulateurs de charge par le biais d'une boîte de jonction pour mettre sous tension continue un onduleur adapté pour une sortie alternative triphasée de 380/400 V.

Le choix de notre appareillage s'est porté après une longue période de consultation de plusieurs fournisseurs et constructeurs, et finalement pour des raisons de disponibilités commerciales, de correspondances techniques et selon le besoin de l'installation, nous avons opté pour les constructeurs Condor pour ce qui est des panneaux et des batteries. Le constructeur Chinois Sandi electric Co, pour la fourniture des régulateurs de charge à MPPT. Le constructeur ABB pour la boîte de jonction et en fin le constructeur Allemand Kaco new enrgy pour l'onduleur triphasé.

Pour résumé, la constitution de notre mini centrale solaire photovoltaïque est comme suit :

- 740 Panneaux solaires photovoltaïques, Condor-CEM320M-72.
- 474 Batteries AGM-GEL, Condor-CGB 12-260 Ah.
- 2 Régulateurs de charge solaire munies du système MPPT, Sandi-SDC480V-200A.
- 1 Onduleur triphasé de haute capacité, Kaco new enrgy-XP200-HV
- 1 Boite de jonction, ABB-1000V.

Bibliographe

[1]: S.LALOUNI « Optimisation de la qualité d'énergie électrique dans le cas d'un chargeur de batteries » ; mémoire de magistère en génie électrique option : commande électrique ; université de BEJAIA, (2005)

[2] : <http://www.meteofrance.fr>

[3]:PIETRUSCHKA D.,EICKR U., HUBER M., SCHUMACHER J. «experimental performance analysis and modeling of liquid desiccant cooling systems for air conditioning in residential buildings», international journal of refrigeration,2006.

[4]: BERNARD. J, énergie solaire: calculs et optimisation. Ed ellipses. (2004)

[5] :GIVONI, B. « l'homme, l'architecture et le climat » .Edition du Moniteur, Paris. 1978

[6] :<https://www.futura-sciences.com>. (février 2019)

[7] :<http://www.thermoradiances.ch>(février 2019)

[8] :https://www.univusto.dz/laboratoires/laar/images/doctorat/diapo_soutenance_k_bouchouicha.pdf

[9] : S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France 2009.

[10] : ZIDANE ,A «Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque au niveau d'un puits de gaz.»Mémoire de master université de Bejaia Algérie. 2012.

[11]: A. LABOURET, M. VILLOZ, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD, Paris, (2006).

[12] : <https://as-p.ch/le-solaire-photovoltaïque>

[13] : Z. ROUMILA «Etude d'un système hybride (photovoltaïque- éolien-diesel » thèse de doctorat université de BejaiaAlgérie, 2018

[14] : <https://www.energieplus-lesite.be>

[15] : O.GERGOUD «Modalisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » thèse de doctorat de l'ENS de Cachan France, 2002.

[16] J. ROYER, T. DJIAKO, E. SCHILLER et B. SADASY « Le pompage photovoltaïque» manuel de cours à l' intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF, université d'Ottawa, EIER, CREPA.ISBN 2-89481-006-7, 1998.

[17] :<https://www.researchgate.net>

[18]: Dirk Use Sauer, «electrochemical storage for photovoltaic», Fraunhofer institute for solar energy systems ISE, Freiburg, Germany, 2004

[19]:A.Belhoucine et S.Zaidi. « Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome ». Mémoire de master II. Université de Bejaia 2012

[20] : Cours Mr.Alkama système de stockage

[21]:A. Singo. « Système D'alimentation Photovoltaïque Avec Stockage Hybride Pour L'habitat Energétiquement Autonome ». Thèse Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I France; 3 Février 2010.

[22] :Site Web: www.physique-appliquée.net/2010

[23]: Corinne Alonso Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie,UNIVERSITÉ PAUL SABATIER – TOULOUSE III, Décembre 2003.

[24] Ch.Serir, « OPTIMISATION DES SYSTÈMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE », Mémoire de Magister université de Bejaia Algérie, 2012.

[25] : D. Sera ,R. Teodorescu,T. Kerekes. «Teaching maximum power point trakers using a photovoltaic array model with graphical user interface». Instates of energy technology, Aalborg pontoppidanstreade 101DK-9220,Aalborg, Denmark.

[26] I.Vechiu. <<Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome>>. Thèse de doctorat de l'université du havre, France,2005.

[27] :<https://library.e.abb.com>

[28]:O.GERGAUD, B.MULTON, BEN AHMED « Analyses and experimental validation of various phovoltaic system models » 7^{ème} congrée international ELECTRIMACS, Moréal, Canada, 2002.

[29] : W.C. Benmoussa, S. Amara et A. Zerga (Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin) Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen (2007)

[30]. S.AISSOU, « Caractérisation et optimisation de puissance des systèmes photovoltaïques », Thèse de doctorat, UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA.BEJAIA,(2016) .

[31]: S. Lalouni, «Etude, commande et simulation d'une chaine hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie électrique» .thèse de doctorat en sciences, département d'Electrotechnique, université A.Mira de Bejaïa, 2009.

[32] : M.Djarallah « contribution à l'étude des Systèmes photovoltaïque résidentiels couples au réseau électrique », Thèse de doctorat en sciences à l'université de Batna, Algérie, 2008

[33] M.Belhadj, «Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome». Mémoire de Magister Option : Microélectronique –Photovoltaïque Centre universitaire de Bechar(Institut des Sciences Exactes), Algérie, 2008.

[34] : J. Royer, all, « Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens », Université d'Ottawa, 1998.

[35] BENDJOUDI Fawzi et LAKHDARI Farid «Etude et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque avec batteries» Mémoire de Master2. Université de Bejaïa ,2014

[36] : Ch.Serir (Commande D'un Système Multi-Sources Photovoltaïque/Eolien Associé à un système de stockage) , Thèse de doctorat l'université de Bejaia, Algérie, 2017

[37] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, A. Lazaro, «Review of the Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-Alone Photovoltaic Systems», Solar Energy Materials & Solar Cells, vol: 90, N°: 11, pp: 1555 –1578, 2006.

[38] N. Patcharaprakiti, S. Premrudeepreechacharn, Y. Sriuthaisiriwong, «Maximum power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid-connected photovoltaic system», Renewable Energy , 30(11): 1771-1788,2005.

[39] cours de UED12 « Technique d'optimisation et de contrôle de puissance» Master I énergies renouvelables en électrotechnique 2018/2019

[40]: H. BUHLER, “Réglage Par Logique Floue”, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes Lausanne. (1994).

[41] Bencherif Mohammed «Modélisation des paramètres d'une batterie Plomb-Acide, et son intégration dans un système photovoltaïque autonome», Thèse université Abou Bekr Belkaid –Tlemcen. 2014-2015.

[42] site web : <https://fr.weatherspark.com>

[43] cours UEF 2321 « systèmes multi sources à énergie renouvelables » Master II énergies renouvelables en électrotechnique 2018/2019

[44] Simon Tokanmè ALLOGANVINON, « conception d'une mini-centrale photovoltaïque pour l'alimentation partielle de l'installation électrique du ministère du travail et de la fonction publique (MTFP) du BENIN » mémoire master, Benin, 2011/2012.



ETS B.M.A
Entreprise d'Installation de Réseaux et de Centrales
Électriques et Téléphoniques

Estimatif du bilan énergétique du projet des 50 Bureaux de l'annexe wilayale de Tindouf

Code	Désignation	Puissance (kW)
1	Réseau d'éclairage intérieur	19,518
2	Alimentation des prises de courant	48,000
3	Réseau Informatique/Téléphonique	6,400
4	Alimentation des climatiseurs	63,800
5	Réseau de mise en sécurité incendie	4,000
6	Système de télésurveillance	4,800
7	Eclairage Extérieur	16,260
8	Bach à eau	8,000
9	Ascenseurs	16,000
Bilan énergétique total		186,778

NB : L'autoconsommation des systèmes de mise en sécurité incendie est inférieure à 0,5 kW.

Ingénieur d'études PV

Fait le 20/05/2019



ETS B.M.A

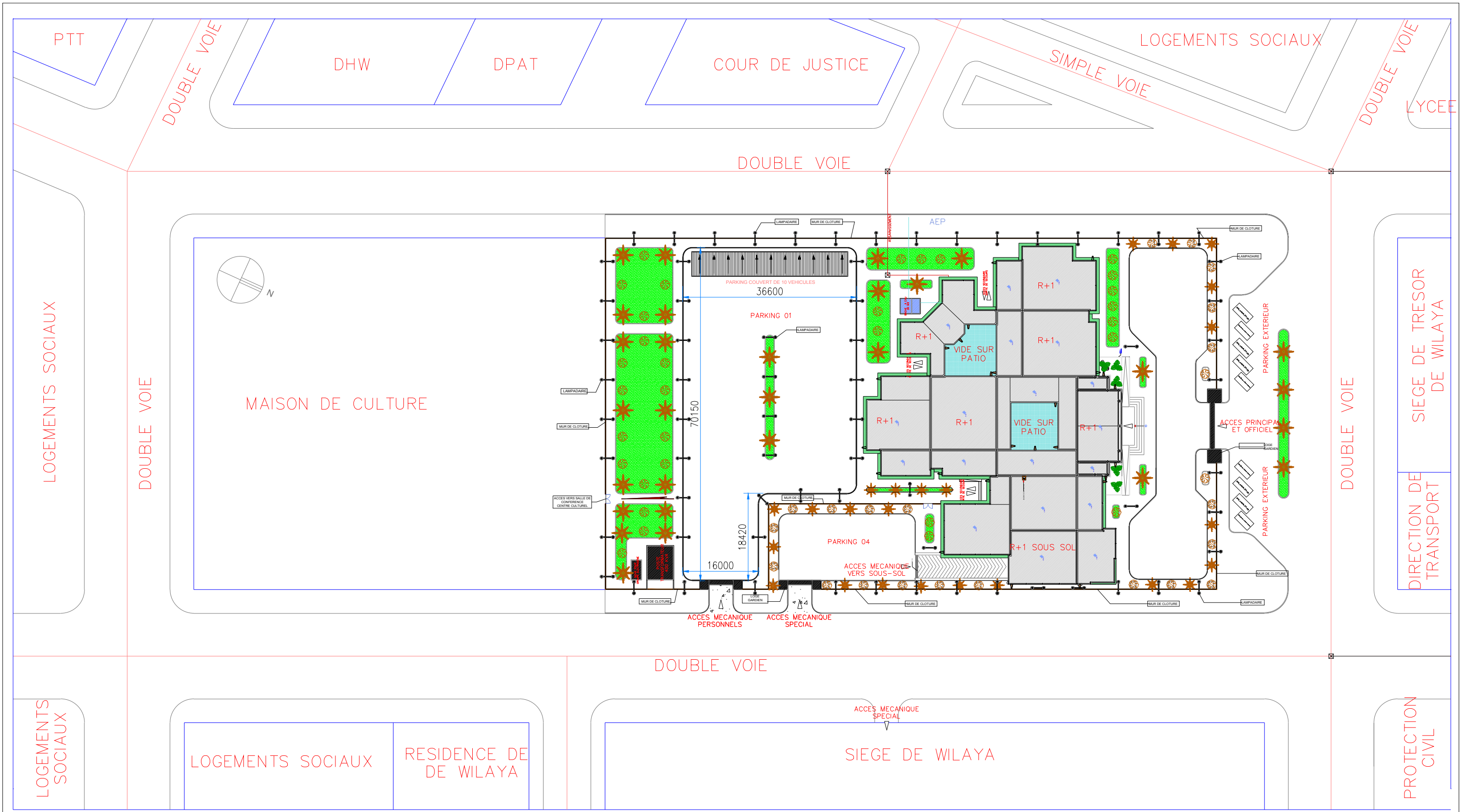
Entreprise d'Installation de Réseaux et de Centrales
Électriques et Téléphoniques

Estimatif du bilan énergétique nocturne du projet des 50 Bureaux de l'annexe wilayale de Tindouf

Code	Désignation	Puissance (kW)
1	Réseau d'éclairage intérieur (50%)	9,759
2	Alimentation des prises de courant	5,00
3	Réseau Informatique/Téléphonique	-
4	Alimentation des climatiseurs	3,500
5	Réseau de mise en sécurité incendie	4,000
6	Système de télésurveillance	4,800
7	Eclairage Extérieur	-
8	Bach à eau	1,00
9	Ascenseurs	-
Bilan énergétique total (kW)		28,059

NB : L'autoconsommation des systèmes de mise en sécurité incendie est inférieure à 0,5 kW.

Ingénieur d'études PV
Fait le 12/06/2019



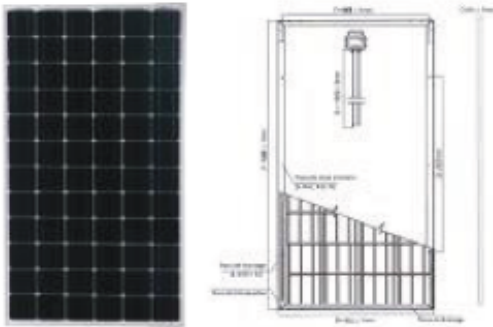
PLAN DE MASSE
 ECHELLE: 1: 750

Annexe 4

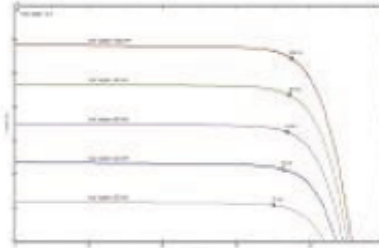
Module solaire photovoltaïque

Monocristallin 72 cellules

190/195/200Wc



Courbe I-V



Caractéristiques électriques

Type de module	Unité	CEM190M-72	CEM195M-72	CEM200M-72
Puissance nominale	Wc	190	195	200
Tension en circuit ouvert (Vco)	V	45,20	45,40	45,60
Courant de court Circuit Isc	A	5,56	5,67	5,80
Tension mpp Vmpp	V	36,60	36,80	36,90
Courant mpp Impp	A	5,19	5,30	5,42
Tension maximale du système VDC	V	1000		
Charge maximale De fusibles (A)	A	15		
Facteur de température (cellule):				
Température nominale de fonctionnement		NOCT	45±2°C	
Coefficient de température de puissance		%/°C	-0.41	
Coefficient de température de courant		%/°C	+0.06	
Coefficient de température de voltage		%/°C	-0.32	

Caractéristiques mécaniques

Type de cellule	Cellule monocristalline avec anti-reflection
Nombre de cellules par module	72 cellules (6x12)
Dimensions de la cellule	125x125 mm
Dimensions du module	1580x808x45 mm
Poids du module	14.5 Kg
Type de verre	Alliage en aluminium anodisé Verre trempé, 3.2 mm d'épaisseur
Boîte de jonction et connecteur	IP65;3 Diodes By-passe et câbles compatibles avec un connecteur MC4
Température d'utilisation	- 40°C à 85°C

STC Irradiation 1000w/m² Température de la cellule 25°C AM = 1.5 Vitesse de vent 1m/s
NOCT Irradiation 800w/m² Température Ambiante 20°C AM = 1.5

Annexe 5

No. de Modèle	SDC480V-200A
Caractéristiques électriques	
Puissance d'entrée Solaire Max.	80000 / 85000 / 90000 / 92000 / 96000 W
Tension @ Max. Puissance d'entrée Solaire	900 VDC
Max. Panneau Solaire Tension en Circuit Ouvert	900 V
Courant de Court Circuit Max. du Panneau Solaire	200 A
Tension du Système Nominale (Batterie)	480 V
Courant de Charge Maximale de la Batterie	200 A
Courant de Charge de Sortie Maximale	200 A
Auto-consommation	≤ 10 mA
Efficacité de Conversion de Pointe	95,00 %

Annexe 6

Powador XP100-HV | XP200-HV | XP250-HV

Electrical data	XP100-HV	XP200-HV	XP250-HV
Input variables			
Max. recommended PV generator power	120 kW	240 kW	300 kW
MPP range	450 V ... 830 V	450 V ... 830 V	450 V ... 830 V
No-load voltage	1000 V*	1000 V*	1000 V*
Max. input current	245 A	467 A	611 A
Ripple voltage	< 3%	< 3%	< 3%
Ripple current	< 4%	< 4%	< 4%
Output variables			
Rated output	100 kVA	200 kVA	250 kVA
Supply voltage	3 x 380/400 V (+/- 10%)	3 x 380/400 V (+/- 10%)	3 x 380/400 V (+/- 10%)
Rated frequency	50 Hz / 60 Hz	50 Hz / 60 Hz	50 Hz / 60 Hz
Rated current	153 A	304 A	380 A
cos phi	0.80 inductive ... 0.80 capacitive	0.80 inductive ... 0.80 capacitive	0.80 inductive ... 0.80 capacitive
Distortion factor	< 3 % at rated output power	< 3 % at rated output power	< 3 % at rated output power

Annexe 7

Type de boîtes de jonction	1 pcs	2 pcs	3 pcs	4 pcs	6 pcs	8 pcs	10 pcs	12 pcs	14 pcs	16 pcs	18 pcs	20 pcs	24 pcs	28 pcs	32 pcs	
Caractéristiques générales																
Tension maximale	1000 V DC															
Nombre d'entrées DC (+ & -, en option)	1	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	28	32	
Protection contre les surtensions	Type 2 remplaçable															
Protection du string	Non			Pour chaque string entrant												
Surveillance	Non								Option							
Paramètres de surveillance	Non								Courant, température et Signaux de protection contre les surtensions de série. Signal de tension et de sectionneur possible en option.							
Protocole de communication	Non								Modbus RS485							
Type de boîtier																
Modèle	Europe					Gemini										
Type de matériau	Gemini															
Type de porte / Ouverture	Transparent, porte battante					Non transparent, porte battante s'ouvrant jusqu'à 180 degrés										
Type de serrure	Ferroir à pression					Portes livrées avec 2 serrures à double barbe standard (3 pour les dimensions 5 et 6)										
Nombre de strings entrants	De 1 à 4					De 6 à 32										
Tension nominale en fonctionnement	1000 V DC															
Degré de résistance aux chocs	IK 10															
Classe de protection	IP65					IP66										
Recyclable						100%										
Paramètres de l'environnement																
Température de fonctionnement	Entre -20 °C et +50 °C															
Température de stockage	Entre -20 °C et +60 °C															
Résistance à la chaleur et au feu	Jusqu'à 750 °C															
Altitude jusqu'à au-dessus du niveau de la mer	Jusqu'à 2000 m															
Humidité de l'air	Jusqu'à 95 %															
Entrée DC																
Entrée de câble	M16 passe-câble, 2,5 - 16 mm ²															
Connexion d'entrée	Bornes			Directement sur le porte-fusible												
Type de fusible	Aucun fusible			Cylindrique 10 x 38 gPV												
Format de fusible				15 A												
Sortie DC																
Sortie passe-câble +/-	M16	M16	M16	M16	M25	M25	M25	M32	M32	M32	M32	M40	M40	M40	M40	
Diamètre du câble de serrage (mm ²)	2,5-16				25-50			70-120				150-240				
Matériau des conducteurs	Cuivre/aluminium															
Type de raccordement	Tuyau					Anneau										
Tension DC	1000 V DC															
Sortie de courant maximale	10 A	20 A	30 A	40 A	60 A	80 A	100 A	120 A	140 A	160 A	180 A	200 A	240 A	280 A	320 A	