

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued
Faculté de la Technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire en Vue de l'Obtention du Diplôme de
MASTER ACADEMIQUE
En Réseaux Electrique

Réf : ...

Systeme Pompage photovoltaïque et d'arrosage pastoral (Etude Technico-économique)

Présenté et soutenu par :

GUEDDA Youcef

KERROUCHE Imad

OUASSA Oussama

Le 08/06/2023

Devant le jury composé de :

Dr. MAMMERI Oussama

Maître de conférences A

Encadreur

Dr. LABBI Yacine

Maître de conférences A

Présidente

Dr. SERHOUD Hicham

Maître de conférences A

Examineur

REMERCIEMENTS

Louange à Allah SWT, nous exprimons notre gratitude infinie pour la patience et la persévérance qu'Il nous a accordées afin de mener à bien cette carrière scientifique et de conclure ce modeste travail.

Nous tenons à remercier chaleureusement notre professeur et rapporteur de projet, le **Dr. MAMMERI Oussama**, pour son accompagnement constant et le partage de ses connaissances tout au long de cette recherche. Nous exprimons notre profonde reconnaissance envers vous, cher professeur, pour le temps précieux que vous avez consacré à la réalisation de ce projet, ainsi que pour vos idées et conseils précieux, en particulier votre critique objective et constructive.

Nous souhaitons également adresser nos sincères remerciements à tous les membres du jury d'avoir accepté de discuter et d'évaluer cette thèse, en l'enrichissant de leurs commentaires et suggestions significatifs.

Nous profitons de cette occasion pour exprimer notre gratitude envers les chercheurs qui ont généreusement partagé leurs études, travaux et articles en ligne, contribuant ainsi à élargir notre champ de recherche et celui des autres intéressés.

De plus, nous souhaitons remercier toutes les personnes qui nous ont apporté leur aide, directement ou indirectement, de près ou de loin.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance envers l'Administration de l'Université Echahid Hama Lakhdar, en particulier le Département de Génie électrique et tous ses membres, pour leur soutien et les ressources de recherche qu'ils ont mises à notre disposition.

DEDICACE

Nous aimerions dédier ce travail à nos parents pour la raison de ce que nous sommes devenus aujourd'hui.

Nous aimerions vous exprimer notre profonde gratitude et notre appréciation pour votre soutien inconditionnel tout au long de notre carrière d'études. Votre présence, vos encouragements et vos précieux conseils ont été les piliers qui ont alimenté notre motivation pour atteindre cette étape.

Ce mémoire est le résultat de nombreuses heures de recherche, de réflexion intensive et de dévouement. Sans votre soutien indéfectible, il aurait été impossible de franchir ces étapes avec autant de confiance et de succès.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude à nos enseignants, à notre superviseur et à tous ceux qui ont contribué à la formation de notre pensée critique et à l'élargissement de nos horizons intellectuels.

Enfin, nous dédions ce travail à notre famille et à nos amis qui nous ont soutenus tout au long de ce voyage. Votre compréhension et vos encouragements ont été nos sources de réconfort dans les moments de doute et d'épuisement. Vous avez été nos piliers émotionnels et nous vous en sommes infiniment reconnaissants.

Votre influence positive restera à jamais gravée dans notre mémoire et continuera de nous inspirer dans toutes nos réalisations futures.

Avec tout notre amour sincère et notre gratitude.

- GUEDDA Youcef.
- KERROUCHE Imad.
- OUASSA Oussama.

Titre
***System Pompage photovoltaïque
et d'arrosage pastoral***

Cette étude vise à concevoir de l'importance d'énergies renouvelables utilisées dans les Zones isolées sur le réseau de distribution d'électricité pour ses nombreux avantages. Parmi les domaines dans lesquels on trouve le pompage d'eau, mais plusieurs problèmes entravent son utilisation, notamment le coût élevé et les faibles rendements.

Dans ce travail nous présenterons sur le système pompage photovoltaïque ainsi que le principe de fonctionnement et le principe de fonctionnement du système de pompage d'eau solaire, composé de plusieurs éléments communs : **générateur d'énergie solaire, pompe immergée et réservoir d'eau**. Avec un exemple vivant d'arrosage pastoral dans la région de Wilaya d'El Oued.

Mots clés

- Energie solaire.
- Pompage d'eau.
- Arrosage pastoral.
- Energies renouvelables.
- Photovoltaïque.

Title

**System Photovoltaic pumping and
pastoral irrigation**

In this research paper, we speak of renewable energy for rural places. ' electricity grid for all of its advantages. There are several places where water pumping takes place, including Utilization has a number of issues, including high costs and poor returns. As a result, we have finished writing this memo in which we described the photoelectric system as well as the working principal, and solar water pumping's working principal system is made up of numerous common components, including a submersible pump and a solar energy generator reservoir. Too much water is a practical illustration of pastoral irrigation in the Wilaya El Oued area.

Keywords

- Solar energy.
- Water pumping.
- Pastoral irrigation.
- Renewable energies.
- Photoelectric.

العنوان نظام الضخ الشمسي الفوتو فولتي و الري الرعوي

في هذا البحث , سنتحدث عن اهمية الطاقات المتجددة المستخدمة في المناطق المعزولة عن شبكة توزيع الكهرباء لمزاياها العديدة. بين المجالات التي يوجد فيها ضخ المياه, و لكن يواجه العديد من المشاكل عند استخدامه, بما في ذلك التكلفة العالية و الانتاج المنخفض.

في هذا العمل سنقدم عن النظام الكهروضوئي و اساسيات عمله لضخ الماء الذي يتكون من العناصر المشتركة : مولد الطاقة الشمسية, المضخة المغمورة و خزان الماء. مع مثال حي على الري الرعوي في منطقة ولاية الوادي.

الكلمات المفتاحية

- الطاقة الشمسية.
- ضخ المياه.
- الري الرعوي.
- الطاقة المتجددة.
- الكهروضوئية.

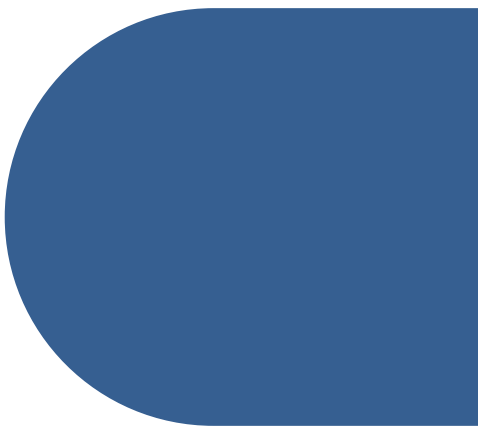


TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES TABLEAUX	xvii
LISTE DES SYMBOLES	xix
LISTE DES ABREVIATIONS	2
INTRODUCTION GENERALE	2

CHAPITRE I : Généralité Sur Le Système Photovoltaïque

I.1 Introduction.....	2
I.2 Énergie renouvelable en Algérie.....	5
I.3 Qu'est-ce que l'énergie solaire ?	3
I.4 Potentiel solaire en Algérie.....	7
I.5 Rayonnement solaire et Ensoleillement.....	8
I.5.1 Types de rayonnement solaire au sol	8
I.6 La cellule photovoltaïque.....	9
I.6.1 Qu'est-ce qu'une cellule photovoltaïque.....	10
I.6.2 L'effet photovoltaïque.....	10
I.6.3 Constitution de la cellule photovoltaïque	11
I.6.4 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	11
I.6.5 Technologie d'une cellule photovoltaïque	13
I.6.5.1 1 ^{er} Génération : Cellules cristallines.....	13
I.6.5.2 2 ^{eme} Génération : Cellules à couches minces.....	14
I.6.5.3 3 ^{eme} Génération.....	15
I.6.6 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	15
I.6.6.1 Caractéristiques Courant-Tension	15
I.6.6.2 Caractéristiques Puissance-Tension	16
I.6.7 Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	16
I.6.8 Paramètres climatiques d'une cellule PV	19
I.6.8.1 Influence de l'irradiance (E)	19
I.6.8.2 Influence de la température (T)	20

I.6.9	Regroupement des cellules photovoltaïques	20
I.6.9.1	Regroupement en série	21
I.6.9.2	Regroupement en parallèle	21
I.6.9.3	Regroupement hybride	22
I.6.10	Circuit équivalent d'une cellule	23
I.7	Système photovoltaïque	23
I.7.1	Le générateur photovoltaïque.....	24
I.7.2	Les types des systèmes photovoltaïques	24
I.7.2.1	Systèmes connectés au réseau	24
I.7.2.2	Systèmes hybrides.....	24
I.7.2.3	Systèmes autonomes	24
I.7.3	Les types des systèmes photovoltaïques	25
I.7.3.1	Le convertisseur DC/DC (hacheur).....	25
I.7.3.2	Le convertisseur DC/AC (onduleur)	26
I.7.4	Protection des modules photovoltaïques.....	27
I.7.4.1.	Diodes de by-pass.....	27
I.7.4.2.	Diodes anti-retours	28
I.7.5	Avantages et Inconvénients des systèmes photovoltaïques	28
I.8	Conclusion	29

CHAPITRE II : LES SYSTEMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

II.1	Introduction	31
II.2	Système de pompage solaire	31
II.3	Architecture d'un système de pompage solaire	31
II.4	Qu'est-ce qui compose un système de pompage solaire ?.....	32
II.5	Principe de fonctionnement d'un système de pompage solaire	33
II.5.1	Pompage solaire au fil du soleil.....	33
II.5.2	Pompage solaire avec batterie	34
II.5.3	Les avantages et les inconvénients de ces méthodes de pompage	35
II.6	Qualité de critère de fonctionnement	35
II.7	Système d'électropompe.....	36
II.7.1	Pompe hydraulique	36

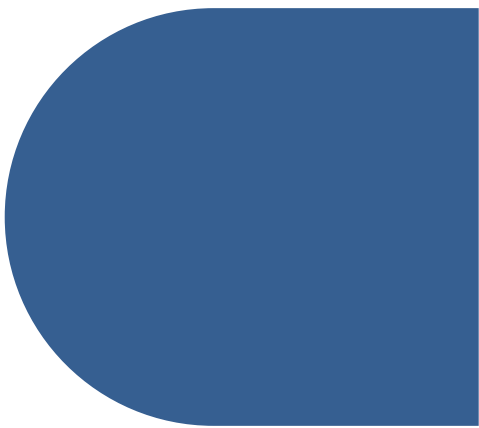
II.7.1.1 Pompes centrifuges ou volumétriques	36
II.7.1.2 Pompes de surface ou Immergées.....	39
II.7.2 Moteur électrique.....	70
II.7.2.1 Moteur à courant continu	40
II.7.2.2 Moteur à courant alternatif	41
II.7.2.3 Comparaison entre un moteur DC et AC	42
II.8 Système d'électropompe.....	43
II.8.1 Les eaux superficielles	43
II.8.2 Les barrages.....	43
II.8.3 Les foggaras.....	43
II.8.4 Les eaux de sources	44
II.8.5 Ressources en eau souterraines	44
II.9 Transfert des eaux des nappes profondes du Sahara	44
II.10 Etude théorique de dimensionnement d'un système de pompage PV.....	45
II.10.1 Evaluation des besoins en eau	45
II.10.1.1 Détermination de la consommation spécifique.....	45
II.10.2 Calcul de l'énergie hydraulique quotidienne requise	46
II.10.2.1 Calcul de la hauteur manométrique totale (HMT)	46
II.10.3 Calcul de l'énergie électrique nécessaire par jour E_{elec}	50
II.10.4 Énergie solaire disponible et dimensionnement du pompage PV	50
II.10.4.1 Estimation de l'ensoleillement.....	50
II.10.4.2 Dimensionnement du champ photovoltaïque.....	50
II.10.4.2.1 Calcul de la puissance crête P_{cr}	51
II.10.4.2.2 Détermination de tension du système	51
II.10.4.2.3 Le nombre de modules photovoltaïques	51
II.10.4.2.4 Critères de Choix de type de pompe	52
II.10.4.2.5 Choix de l'onduleur	53
II.11 Conclusion.....	53

CHAPITRE III : Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque

III.1	Introduction	55
III.2	Situation géographique d'El Oued	55
III.2.1.	Coordonnées géographiques de Reguiba (Région ELKARMA)	56
III.3	Milieu physique	56
III.3.1.	Climatologie	56
III.3.2.	Température moyenne	57
III.3.3.	Pluviométrie	57
III.3.4.	Soleil	58
III.3.5.	Rayonnement solaire	58
III.4	Dimensionnement complet de l'installation PV	59
III.4.1.	Détermination du besoin en eau	59
III.4.2.	La hauteur manométrique totale (HMT)	59
III.4.3.	Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire	60
III.4.4.	Calcul de l'énergie électrique	61
III.4.5.	Calcul de la puissance crête	61
III.4.6.	Détermination de tension du système	61
III.4.7.	Détermination du nombre de modules photovoltaïques	61
III.4.8.	Choix de type de pompe	63
III.4.9.	Choix des câbles	63
III.4.9.1	Détermination de la section des conducteurs entre les panneaux et l'onduleur	64
III.4.9.2	Détermination de la section des conducteurs entre l'onduleur et la pompe	64
III.4.10.	Conception du support des panneaux	65
III.5	Etude technico-économique	66
III.5.1.	L'amortissement du système PV	67
III.6	Dimensionnement de pompage PV simplifié avec Excel	69
III.7	Conclusion	73

CHAPITRE IV : Maximisation de l'efficacité énergétique dans l'irrigation grâce à l'optimisation du pompage photovoltaïque

IV.1	Introduction.....	75
IV.2	Principe de la commande MPPT	75
IV.3	Classification Des Commandes MPPT.....	76
IV.3.1.	Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée	76
IV.3.2.	Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche	77
IV.3.3.	Les Algorithmes MPPT.....	78
IV.3.3.1.	Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)	79
IV.3.3.2	La Commande MPPT Flou.....	84
IV.3.3.2.1.	Principe de la logique floue	84
IV.3.3.2.2.	Théorie des ensembles flous.....	85
IV.3.3.2.3.	Théorie des ensembles flous.....	85
IV.3.3.2.4.	Conception du contrôleur flou.....	86
IV.3.3.2.5.	Types des systèmes flous.....	87
IV.3.3.2.6.	Algorithme P&O MPPT Basé Sur la Logique Floue Proposé.....	88
IV.4	Modélisation de la régulation de puissance maximale des panneaux solaires via MATLAB/SIMULINK	89
IV.4.1.	Modèle SIMULINK du contrôleur MPPT à base de P&O	89
IV.4.1.1.	Résultats de simulation MPPT P&O	90
IV.4.2.	Modèle SIMULINK du contrôleur MPPT à base de P&O optimiser par logique floue.....	91
IV.4.2.1.	Résultats de simulation MPPT P&O	93
IV.5	Conclusion	94
	CONCLUSION GENERAL.....	96
	Références	99
	ANNEXES.....	105



LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : Généralité Sur Le Système Photovoltaïque

Figure I.01 Champ photovoltaïque sous concentration.....	6
Figure I.02 Champ photovoltaïque fixe	6
Figure I.03 Irradiation globale journalière au mois de Juillet sur les plans : a- horizontal et b-normal.....	7
Figure I.04 Irradiation globale journalière au mois de Décembre	8
Figure I.05 Les types des rayonnements solaires	9
Figure I.06 Construction d'un système solaire photovoltaïque	10
Figure I.07 Représentation de la cellule photovoltaïque.....	11
Figure I.08 Libération d'électrons sous l'effet de photons	12
Figure I.09 Jonction P-N.....	12
Figure I.10 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	13
Figure I.11 Cellules monocristallines	13
Figure I.12 Cellules polycristallines	14
Figure I.13 Cellules à couches minces	14
Figure I.14 Caractéristique $I=f(U)$ d'une cellule solaire	15
Figure I.15 Caractéristique $P=f(U)$ d'une cellule solaire	16
Figure I.16 Les caractéristiques électriques et les paramètres physiques d'une cellule solaire	17
Figure I.17 Essai en circuit ouvert	17
Figure I.18 Essai en court-circuit	18
Figure I.19 Effet de l'éclairement sur les caractéristiques électriques d'une cellule PV pour T constante et E variable.....	19
Figure I.20 Effet de l'éclairement sur les caractéristiques électriques d'une cellule PV pour T variable et E constant.	20
Figure I.21 Regroupement en série des cellules photovoltaïques	21

Figure I.22 Regroupement en parallèle des cellules photovoltaïques	22
Figure I.23 Montage hybride des cellules photovoltaïques	22
Figure I.24 Circuit équivalent d'une cellule PV	23
Figure I.25 Assemblage de cellules, du module au Générateur PV	24
Figure I.26 Rôle du système de conditionnement de puissance.....	26
Figure I.27 Protection d'un champ photovoltaïque composé de N_{st} strings branchés en parallèle comportant chacun de modules associés en séries	27
Figure I.28 Fonctionnement des diodes bypass	28

CHAPITRE II : LES SYSTEMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

Figure II.01 Architecture d'un système de pompage solaire	32
Figure II.02 Construction d'un système de pompage solaire	32
Figure II.03 Mode de fonctionnement sans batterie	34
Figure II.04 Mode de fonctionnement avec batterie	34
Figure II.05 Pompe volumétrique.....	37
Figure II.06 Pompe centrifuge.....	38
Figure II.07 Pompe de surface	39
Figure II.08 Pompe immergée.....	40
Figure II.09 Moteur à courant continu	40
Figure II.10 Schéma synoptique simplifié du pompage PV par motopompe DC	41
Figure II.11 Moteur synchrone.....	41
Figure II.12 Schéma synoptique simplifié du pompage PV par motopompe AC	42
Figure II.13 Transfert des eaux des nappes profondes du Sahara	44
Figure II.14 Hauteur manométrique total	47
Figure II.15 Formule de Jules Dipuit	48
Figure II.16 critère de choix de pompe selon besoin journalier et HMT	52

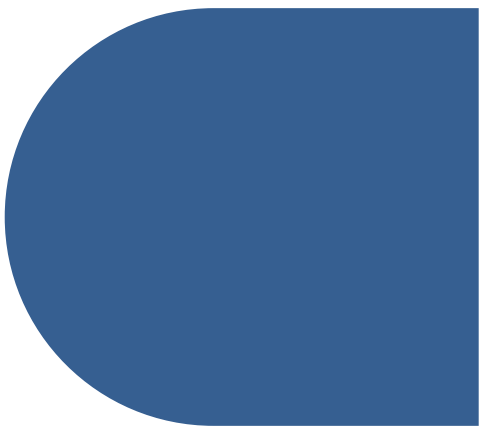
CHAPITRE III : Généralité Sur Le Système Photovoltaïque

Figure III.01	Localisation d'EL OUED	55
Figure III.02	Arrosage pastoral d'El-oued	56
Figure III.03	Température moyenne maximale et minimale à Oued Souf.....	57
Figure III.04	Pluviométrie mensuelle moyenne à Oued Souf.....	58
Figure III.05	Heures de clarté et crépuscule à Oued Souf.....	58
Figure III.06	Rayonnement solaire incident en ondes courtes quotidien moyen el oued.....	59
Figure III.07	Besoins de l'utilisateur.....	62
Figure III.08	critère de choix de pompe selon besoin journalier et HMT	63
Figure III.09	schéma d'un support métallique des panneaux solaires avec une inclinaison de 45°	65
Figure III.10	Distribution des coûts du système de pompage photovoltaïque.....	66
Figure III.11	Histogramme d'amortissement du système de pompage (Sans aide de l'état)	66
Figure III.12	Histogramme d'amortissement du système de pompage (Avec aide de l'état)	66
Figure III.13	L'interface de programme EXCEL.....	69
Figure III.14	Le besoins journalières	70
Figure III.15	Inscription	70
Figure III.16	Dimensionnement	71
Figure III.17	Facture	72
Figure III.18	Exemple de facture	72

CHAPITRE IV : Généralité Sur Le Système Photovoltaïque

Figure IV.01	Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge	75
Figure IV.02	Principe de la commande MPPT	76
Figure IV.03	Recherche du PPM par la méthode (P&O)	80
Figure IV.04	l'algorithme de P&O classique.....	81

Figure IV.05	Divergence de la méthode P&O	82
Figure IV.06	Algorithme du poids d'un troisième point	83
Figure IV.07	Schéma fonctionnel de la commande par logique floue	86
Figure IV.08	Fonctions d'appartenance floues	87
Figure IV.09	Système photovoltaïque avec contrôle MPPT à logique floue	88
Figure IV.10	Conception du système d'optimisation.....	89
Figure IV.11	MPPT basé sur P&O : Profil d'extraction de puissance du panneau photovoltaïque.....	90
Figure IV.12	MPPT basé sur P&O : Profil d'extraction de tension du panneau photovoltaïque	90
Figure IV.13	MPPT basé sur P&O : Profil d'extraction de courant du panneau photovoltaïque	90
Figure IV.14	Conception du système d'optimisation.....	92
Figure IV.15	Fuzzy logic control.....	92
Figure IV.16	MPPT basé sur P&O optimisé par FLC : Profil d'extraction de puissance du GPV. (A) MPPT P&O optimiser par logique floue ; (B) MPPT P&O.....	93
Figure IV.17	MPPT basé sur P&O optimisé par FLC: Profil d'extraction de tension du GPV	93
Figure IV.18	MPPT basé sur P&O optimisé par FLC: Profil d'extraction de courant du GPV	93



LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : Généralité Sur Le Système Photovoltaïque

Tableau I.01 Répartition du potentiel solaire en Algérie	7
---	----------

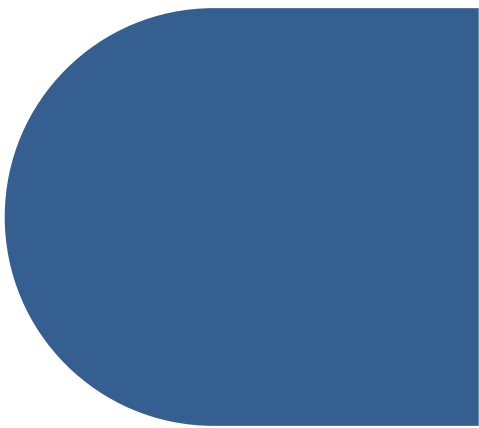
CHAPITRE II : LES SYSTEMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

Tableau II.01 Les avantages et inconvénients des pompages au fil du soleil et avec batteries	35
Tableau II.02 Comparaison entre un moteur DC et AC	42
Tableau II.03 Caractéristiques d'un moteur électrique monophasé et triphasé	43
Tableau II.04 Consommation spécifique donnée par l'OMS	45
Tableau II.05 liste de valeurs de K_{ac}	48
Tableau II.06 Tension de système photovoltaïque selon la puissance crête	51
Tableau II.07 Choix de type de pompe	52

CHAPITRE III : Généralité Sur Le Système Photovoltaïque

Tableau III.01 Tension de système photovoltaïque selon la puissance crête	61
Tableau III.02 Devis Estimatif D'un Système De Pompage PV	66
Tableau III.03 Durée de vie des composants d'un système de pompage photovoltaïque.	67

CHAPITRE IV : Généralité Sur Le Système Photovoltaïque



LISTE DES SYMBOLES

LISTE DES SYMBOLES

Source solaire

E	[W/m ²]	Éclairement (souvent appelé aussi irradiance) solaire.
G	[Wh/m ²] ou [KWh/m ²]	Irradiation solaire.
T	[°C] ou [K]	Température incidente.
h	[s]	Constante de Planck.
c	[m/s]	Vitesse de la lumière.
E_{ph}	[J]	Énergie du photon.

Générateur photovoltaïque

I_{CC}	[A]	Courant de court-circuit d'une cellule photovoltaïque.
U_{co} ou V_{co}	[V]	Tension de circuit ouvert d'une cellule photovoltaïque.
I_{CC}^T	[A]	Tension de circuit ouvert d'une cellule photovoltaïque.
V_{co}^T ou U_{co}^T	[V]	Tension en circuit ouvert de plusieurs cellules connectées en parallèle.
I_{op}	[A]	Tension en circuit ouvert de plusieurs cellules connectées en parallèle.
V_{op} ou U_{op}	[V]	Tension optimale (tension à puissance photovoltaïque maximale).
I ou I_{pv}	[A]	Courant photovoltaïque de sortie.
V ou V_{pv}	[V]	Tension photovoltaïque de sortie.
V_t	[V]	Tension thermique de la diode.
I_{ph}	[A]	Photo-Courant (quantité de photons absorbés par la cellule).
I_D	[A]	Courant de la diode.

I_O	[A]	Courant de saturation de la diode.
I_{si}	[A]	Courant de saturation inverse de la diode.
I_p	[A]	Courant de la résistance parallèle
P_{MAX}	[W]	Puissance photovoltaïque maximale correspondant à la coordonnée (VOP, IOP).
P_{IN}	[W]	Puissance photovoltaïque maximale correspondant à la coordonnée (VCO, ICC).
FF	[-]	Facteur de forme de la conversion photovoltaïque.
η	[%]	Rendement de la cellule solaire.
S	[m ²]	Surface de la cellule photovoltaïque.
R_S	[Ω]	Résistance série de la cellule solaire.
R_P	[Ω]	Résistance parallèle de la cellule solaire.
N_S	[-]	Nombre de cellules liées en série.
N_P	[-]	Nombre de cellules liées en série.
I_{ond}	[A]	Le courant absorbé par l'onduleur.
I_{mpp}	[A]	Le courant de module PV.
$V_{m.ond}$	[V]	La tension moyen de l'onduleur.

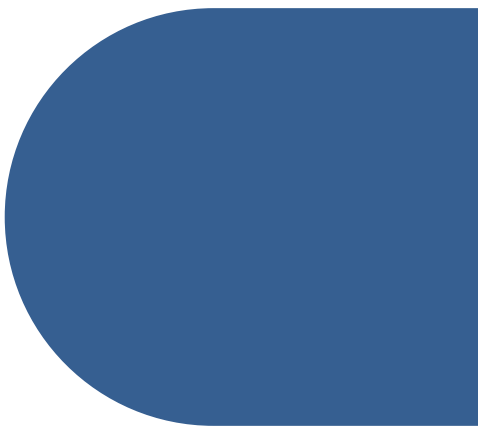
Dimensionnement de pompage photovoltaïque

E_h	[kWh/j].	Énergie hydraulique.
C_h	[kg.s.h/m ²]	Constante hydraulique.
Q	[m ³ /s] ou [l/h]	Volume d'eau.
HMT	[m]	Hauteur manométrique total.
g	[m/s ²]	La gravité terrestre.
ρ	[Kg/m ³]	Densité de l'eau
H_g		
P_c	[m]	Les pertes de charge causées par la friction entre l'eau et les parois des conduites varient en fonction de la distance entre les conduites, leur diamètre et le débit de la pompe, et sont mesurées en mètres d'eau.

S_0	[m]	Le rabattement.
N_s	[m]	La distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au point le plus élevé auquel on doit pomper l'eau.
H_r	[m]	Hauteur du réservoir.
N_d	[m]	Représente les pertes d'eau dans la tuyauterie.
f	[-]	Coefficient de friction des parois de la tuyauterie.
L	[m]	Longueur de la tuyauterie.
v	[m/s]	Vitesse moyenne du fluide.
D	[m]	Diamètre de la tuyauterie.
E_{elec}	[KWh]	L'énergie électrique nécessaire par jour.
η_G	[%]	Rendement du groupe de pompage.
P_{cr}	[KWc]	La puissance crête.
F_c	[%]	Le facteur de correction.
ε	[%]	La chute de tension.

Fuzzy

$\mu_A(x)$	[-]	Fonction d'appartenance d'un variable x .
$\mu_{A \cap B}(x)$	[-]	Intersection.
$\mu_{\neg A}(x)$	[-]	Complément.
$\mu_{A \cup B}(x)$	[-]	Union.



LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES ABREVIATIONS

A

ALP L'algorithme Perturbation adaptative en boucle fermée.

C

CS Convertisseur statique.

CLF Contrôleur à Logique Floue.

CTS Conditions de Test Standard : spécifiées par un éclairnement de 1000[W/m²] et une température de 25[°C].

F

FL Fuzzy logic.

G

GPV Générateur photovoltaïque.

I

InC L'algorithme Incrémentation conductance.

L

LF LF.

M

MPPT Maximum Power Point Tracking.



P

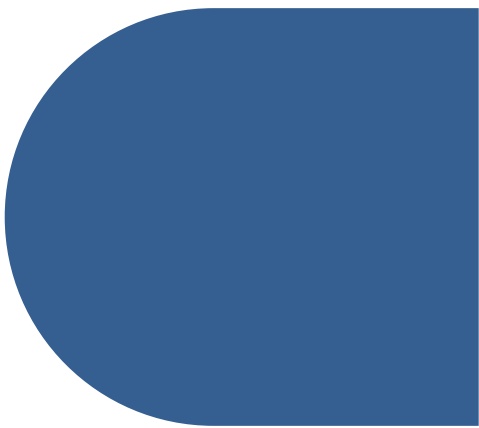
PV	Photo-voltaïque.
PS	Système de pompage solaire.
PPM	Le point de puissance maximale (en anglais : Maximum Power Point).
P&O	Perturber et Observer (en anglais : Perturbe and Observe).

S

Si	Le silicium.
-----------	--------------

T

TS	Système flou de Takagi-Sugeno.
-----------	--------------------------------




INTRODUCTION GENERAL

INTRODUCTION GENERAL

L'énergie est le moteur de toute activité humaine, le pilier de l'économie moderne. Ses sources se sont diversifiées au cours du temps afin de satisfaire les besoins de plus en plus élevés de l'industrie et des consommateurs et pour remédier à certaines problématiques des énergies classique (fossiles), la solution est le recours aux énergies renouvelables. Celles-ci ne sont évidemment pas nouvelles, avec l'avènement de la révolution industrielle, elles ont été marginalisées au profit des sources d'énergie fossile que l'on pensait plus prometteuses. La consommation accrue des énergies ces dernier temps à cause de développement industriel dans différents pays, a largement augmenté le taux des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution atmosphérique et le réchauffement climatique. De plus la flambée des cours du brut et les risques du nucléaire ont fait prendre conscience de la nécessité d'une organisation de la société qui respecte l'environnement dans lequel nous vivons. [1]

Il existe des nombreuses sources d'énergies renouvelables abondantes à travers le monde, telles que l'énergie éolienne, l'énergie hydroélectrique et l'énergie solaire. Parmi elles, l'énergie solaire est particulièrement intéressante car elle est disponible en quantité égale partout sur la planète et est facile à exploiter. L'exploitation de cette énergie renouvelable et non polluante génère peu ou pas de déchets et d'émissions nocives, ce qui les rend idéales pour l'avenir. Elles incluent plusieurs filières technologiques basées sur la source d'énergie choisie et l'énergie utile produite. Peut être utilisé pour alimenter des villes isolées ou pour le pompage de l'eau pour la consommation et l'irrigation agricole.

Dans ce travail de recherche, nous nous sommes intéressés plus particulièrement par l'énergie solaire photovoltaïque avec comme application, le pompage d'eau dans des sites isolés sur la région de oued souf. Nous verrons que cette solution est particulièrement intéressante pour ce type de site. D'autant plus que le territoire national dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation peut atteindre les 3900 heures par an sur le Sahara. L'énergie acquise quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 KWh, soit près de 2263 kWh/m²/an au sud du pays [3]. L'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour le pompage de l'eau est bien adaptée pour la plus part des régions arides et semi-arides en raison de l'existence dans ces régions d'un potentiel



hydraulique souterrain peu profond. Une autre coïncidence très importante favorise l'utilisation de ce type d'énergie pour le pompage d'eau est que la demande d'eau, surtout dans l'agriculture, atteint son maximum par temps chaud et sec où c'est justement le moment où l'on a accès au maximum d'énergie solaire.

Cette étude se concentre sur les aspects techniques et économiques de la solution au problème de pompage de l'eau dans les régions reculées en utilisant l'énergie solaire. Bien que le coût d'installation soit assez élevé, l'utilisation de certaines applications permettra de récupérer les coûts de production rapidement.

Pour traiter et couvrir ces éléments fondamentaux, la structure proposée pour la construction de ce mémoire est la suivante :

CHAPITRE I : Généralité sur le système photovoltaïque : Nous avons présenté les fondements de l'énergie solaire photovoltaïque et ses principes, ainsi qu'une vue d'ensemble du système de pompage solaire.

CHAPITRE II : Les systèmes de pompage photovoltaïque : Cet aperçu présente le pompage solaire. Il aborde également tous les aspects liés au dimensionnement des systèmes PV.

CHAPITRE III : Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque : Cette étude vise à explorer les différentes méthodologies et approches de dimensionnement des systèmes de pompage solaire.

CHAPITRE IV : Maximisation de l'efficacité énergétique dans l'irrigation grâce à l'optimisation du pompage photovoltaïque : vise à rechercher des techniques d'optimisation qui améliorent la qualité fonctionnelle du système et réduisent le coût économique de sa mise en place. Autrement dit, atteindre les plus hauts niveaux de rendement au coût économique le plus bas possible. Puis, il affiche les résultats de la simulation du système optimisé ainsi que leur interprétation.

I

CHAPITRE I

Généralité Sur Le Système Photovoltaïque

Nombre Des Pages : 25

I.1 Introduction

En fait, le soleil fournit toute l'énergie nécessaire à la vie sur Terre. Le défi pour un futur durable consiste à utiliser une partie minime de cette énergie pour répondre aux besoins de l'humanité. Les dernières tendances mondiales indiquent une croissance rapide de l'énergie renouvelable verte grâce à l'utilisation de l'énergie solaire. Les systèmes photovoltaïques sont considérés comme un moyen efficace de générer de l'électricité de manière non polluante.

Actuellement, les systèmes ou bien les générateurs photovoltaïques offrent une solution très fiable, abordable et durable pour générer l'électricité à grande échelle. Ainsi, l'électricité solaire photovoltaïque peut répondre à la demande croissante en électricité, ce qui contribue de manière significative à atténuer la pollution de l'environnement résultant de l'utilisation des énergies fossiles. Peu à peu, l'utilisation de l'énergie photovoltaïque ne cesse d'augmenter dans le monde entier, l'une de ses applications les plus courantes étant le pompage photovoltaïque (appelé aussi le pompage solaire) de l'eau [4].

Un système de pompage solaire est essentiellement un système de pompage électrique dans lequel l'électricité est fournie par un système photovoltaïque. Le pompage solaire présente une alternative propre, simple et économe à l'électricité traditionnelle et au pompage à carburant ainsi qu'il peut entraîner à la fois des avantages socio-économiques en plus de ceux liés au climat. En raison de sa dépendance de sources d'énergie entièrement renouvelables, la technologie de pompage solaire est respectueuse de l'environnement où elle peut être utilisée pour fournir de l'eau pour l'irrigation des cultures, l'élevage du bétail et l'approvisionnement en eau potable [4-5].

Compte tenu de l'importance croissante du pompage solaire, il est devenu un sujet de grand intérêt pour de nombreuses études et recherches académiques. Par conséquent, ce chapitre présentera une étude approfondie des systèmes de pompage photovoltaïque.

I.2 Énergie renouvelable en Algérie

En comparaison avec le développement du parc d'énergie renouvelable à l'échelle mondiale ou européenne, les réalisations en Algérie dans ce domaine sont très modestes.

L'utilisation des énergies renouvelables en Algérie n'a pas dépassé le seuil d'expérience durant cinq décennies d'indépendance, malgré la position géographique stratégique du pays qui dispose de l'un des gisements solaires les plus importants au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures par an, et peut atteindre les

3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{kWh/m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263\text{kWh/m}^2/\text{an}$ au Sud. [22]

I.3 Qu'est-ce que l'énergie solaire ?

L'énergie solaire est une forme d'énergie dépendante du soleil, qui peut être convertie en électricité par des panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques en captant la lumière solaire.

En l'espace de 6 heures, les déserts terrestres reçoivent plus d'énergie solaire que l'humanité n'en utilise sur une année entière. Il existe plusieurs méthodes pour produire et utiliser cette énergie solaire [40] :

- **L'énergie solaire thermique**



Figure I.1 Champ photovoltaïque sous concentration. [73]

- **L'énergie solaire photovoltaïque**



Figure I.2 Champ photovoltaïque fixe. [74]

I.4 Potentiel solaire en Algérie

Au sud algériens, les premières expériences ont été effectuées au début des années quatre-vingt, où la première station d'énergie solaire a été installée à Melouka par une société du Royaume de Belgique, la station est aujourd'hui à l'arrêt, le recours aux énergies renouvelables au sud algérien est indispensable et prioritaire dans tout développement durable de la région, les distances existantes entre les localités, la dispersion de la population dans le sud rend le raccordement au réseau électrique très coûteux. [22]

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est présentée dans le tableau 1.1, selon l'insolation reçue annuellement. [24]

Tableau I.1 Répartition du potentiel solaire en Algérie [24].

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'insolation (Heures/an)	2650	3000	3500
Irradiation moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2263

Les figures I.3 et I.4 illustrent l'irradiation globale quotidienne sur les plans horizontal et normal en décembre et juillet, respectivement. Le gouvernement algérien, reconnaissant le vaste potentiel des énergies renouvelables dans le pays, cherche à promouvoir ce type d'énergie à travers un programme ambitieux qui sera décrit dans la page suivante.

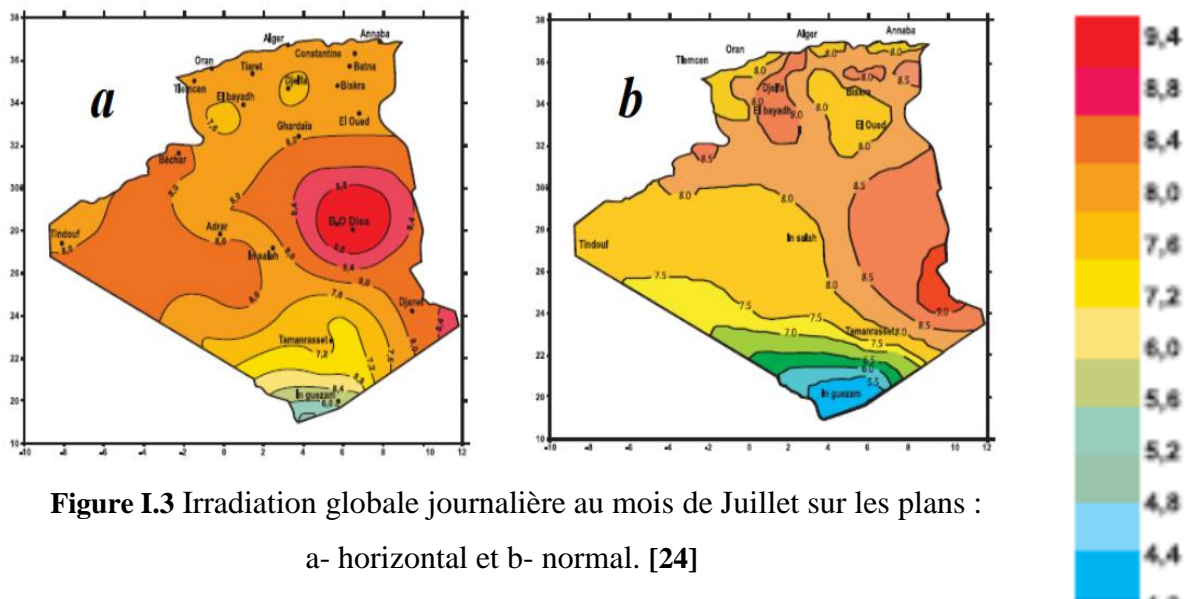


Figure I.3 Irradiation globale journalière au mois de Juillet sur les plans :
a- horizontal et b- normal. [24]

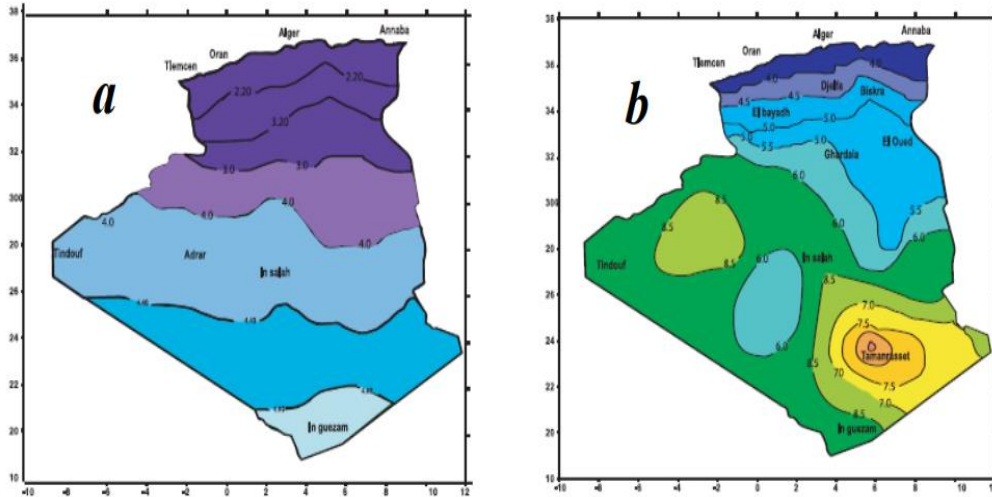


Figure I.4 Irradiation globale journalière au mois de Décembre sur les plans :
a- horizontal et b- normal. [24]

I.5 Rayonnement solaire et Ensoleillement

Ce que l'on désigne par énergie solaire est le rayonnement émis dans toutes les directions par le soleil en direction de la terre. [7]

- **Irradiance (éclairage)** : exprime la puissance du rayonnement solaire incident tombant sur une surface unitaire. Notée (E) et exprimé en [**W/m²**].
- **Irradiation** : exprime l'énergie du rayonnement solaire incident sur une surface de 1[m²]. Cela correspondant à l'intégration de l'irradiance sur une période de temps (l'heure ou la journée). Symbolisé par (G) et son unité de mesure est [**Wh/m²**] ou [**kWh/m²**].

La terre reçoit, à raison de l'exposition au rayonnement solaire, une puissance moyenne de **1.4 [kW.m-2]** pour une surface perpendiculaire à la direction Terre-Soleil. Ce flux solaire est atténué lors de la traversée de l'atmosphère par absorption ou diffusion et suivant les conditions météorologiques et la latitude du lieu. Au niveau du sol, la puissance restante est de l'ordre de **1[kW.m-2]** sous nos latitudes. La quantité d'énergie utilisable varie entre 800 et **7[kWh.m-2]** suivant le lieu. [8]

I.5.1 Types de rayonnement solaire au sol

Trois types de rayonnements solaires parviennent jusqu'au sol après avoir traversé l'atmosphère : le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi.

- On entend par **rayonnement direct** le rayonnement solaire qui atteint une surface spécifique à partir d'un angle solide centré sur le disque solaire.
- Le **rayonnement diffus** est émis par des obstacles tels que les nuages, le sol et les bâtiments, et il provient de toutes les directions.
- Le **rayonnement réfléchi**, également appelé albédo, est le résultat de la collision d'un rayonnement incident, qu'il soit diffusé ou réfléchi, avec un obstacle tel que le sol ou les nuages.

La somme de trois types donne le quatrième type de rayonnement qui est le **rayonnement global**. La figure I.5 sur la page suivante nous montre les types de rayonnement.

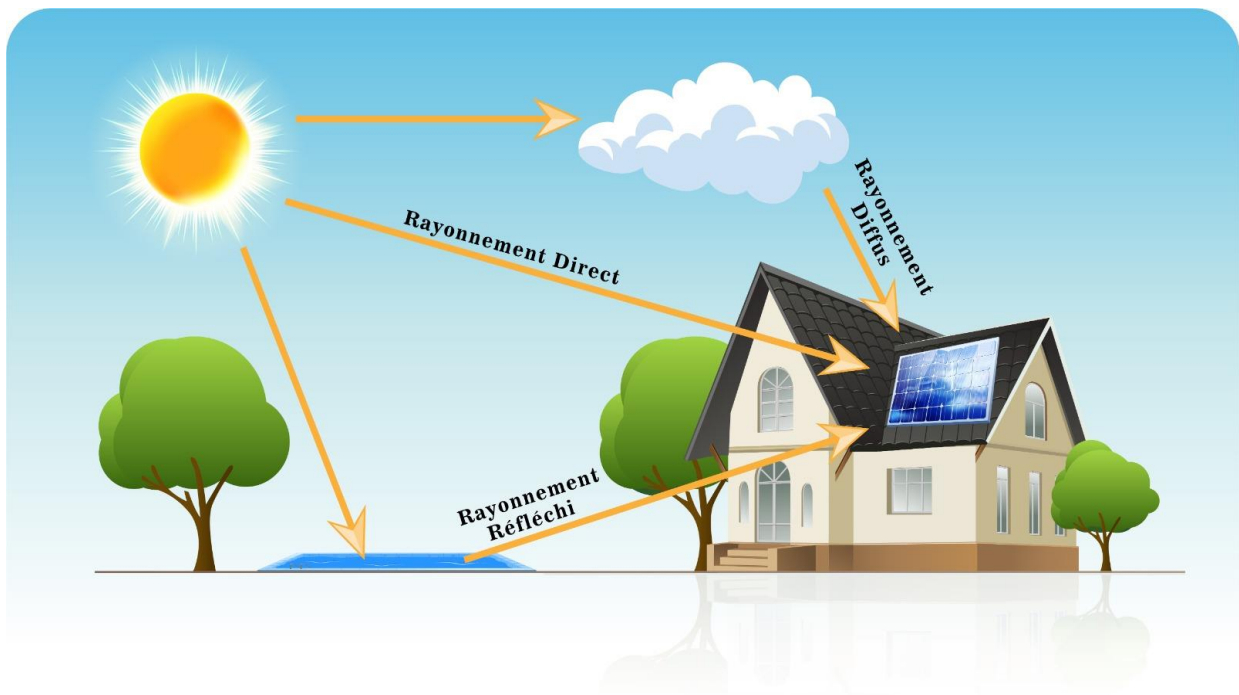


Figure I.5 Les types des rayonnements solaires. [72]

I.6 La cellule photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est produite par la transformation du rayonnement solaire grâce à des cellules photovoltaïques. Ces cellules sont regroupées pour former des modules, puis des panneaux, et enfin une centrale solaire appelée champ photovoltaïque. Ce champ est associé à des équipements complémentaires pour former un système solaire photovoltaïque.



Cellule photovoltaïque

Module photovoltaïque

Champ photovoltaïque

Figure I.6 Construction d'un système solaire photovoltaïque. [10]

Remarque ! Le terme "photovoltaïque" peut être utilisé pour décrire à la fois le phénomène physique de l'effet photovoltaïque et la technologie qui en découle.

I.6.1 Qu'est-ce qu'une cellule photovoltaïque

Une cellule PV est un capteur électronique de la lumière solaire à base des matériaux semi-conducteurs. C'est l'élément élémentaire du système PV dont le rôle est de générer une tension à courant continu sous l'exposition au rayonnement solaire (photons), c'est le phénomène de l'effet PV qui est à l'origine de produire de l'électricité. [12]

I.6.2 L'effet photovoltaïque

Le mot "photovoltaïque", abrégé en "**PV**", est formé par la combinaison de deux termes [9-12]:

- **Photo** : mot d'origine grecque qui signifie la lumière.
- **Voltaïque** : vient de volt et représente l'unité utilisée pour mesurer le potentiel électrique (comme sur une batterie). Le volt a été découvert par l'italien Alessandro Volta lorsqu'il a inventé la pile électrochimique à la fin du XVIIIe siècle.

En général, l'effet photovoltaïque est le résultat de trois actions qui ont lieu simultanément [9-12] :

- Collecte d'électrons libres dans un circuit électrique.
- Libération des électrons en absorbant de l'énergie des photons.
- Absorption de photons.

I.6.3 Constitution de la cellule photovoltaïque

Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur qui sont dopées différemment, Figure (I.7). Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons. [11]

Le silicium (Si) est le matériau semi-conducteur le plus répandu dans la construction de cellules PV. Plus rarement, d'autres semi-conducteurs sont utilisés tels que : diséléniure de cuivre et d'indium (CuInSe₂, noté CIS), tellure de cadmium (CdTe), ...etc. [9]

Les cellules PV se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté et situées entre deux conducteurs (électrodes) métalliques produisant un contact électrique, en plus, L'épaisseur d'une cellule PV est de l'ordre du millimètre. [12]

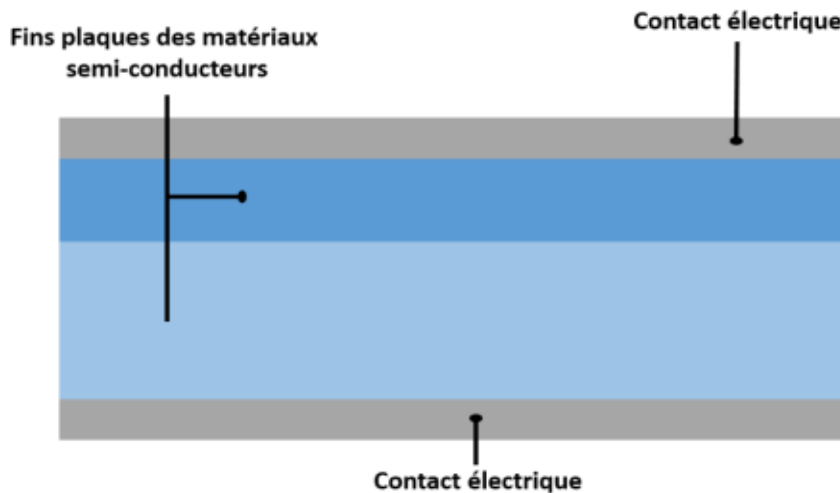


Figure I.7 Représentation de la cellule photovoltaïque. [12]

I.6.4 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule solaire peut être comparée à une diode photosensible. Il fonctionne sur la base des propriétés des matériaux semi-conducteurs qui génèrent un flux d'électrons lorsqu'ils sont exposés à la lumière (photons). Lorsque les photons frappent un élément semi-conducteur (tel que le silicium), ils séparent les électrons de ses atomes. Ces électrons se déplacent au hasard à la recherche de trous disponibles où ils peuvent se repositionner. [12]

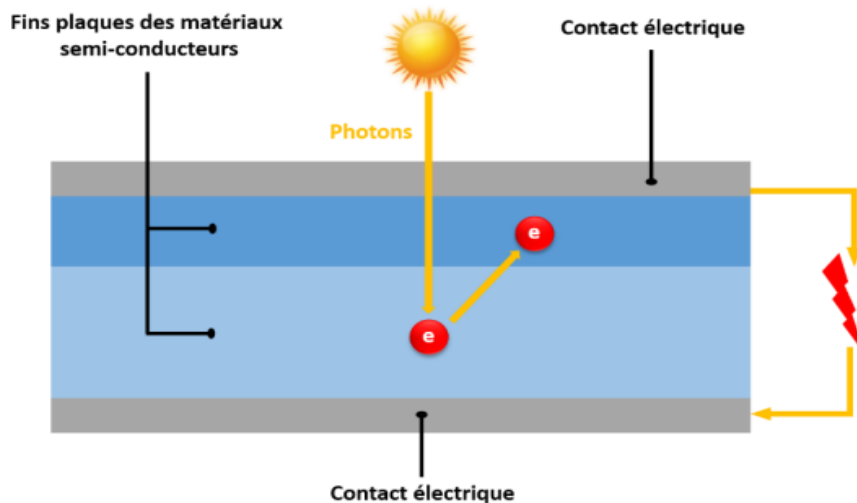


Figure I.8 Libération d'électrons sous l'effet de photons. [12]

Mais pour qu'il y a un courant électrique, il doit que ces mouvements d'électrons vont tous dans le même sens. Pour cela, il faut associer deux couches minces d'un semi-conducteur dopées différemment. Cette double couche devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative **N**, le côté avec moins d'électrons devient la borne positive **P**. Entre les deux couches, il se crée un champ électrique. [9]

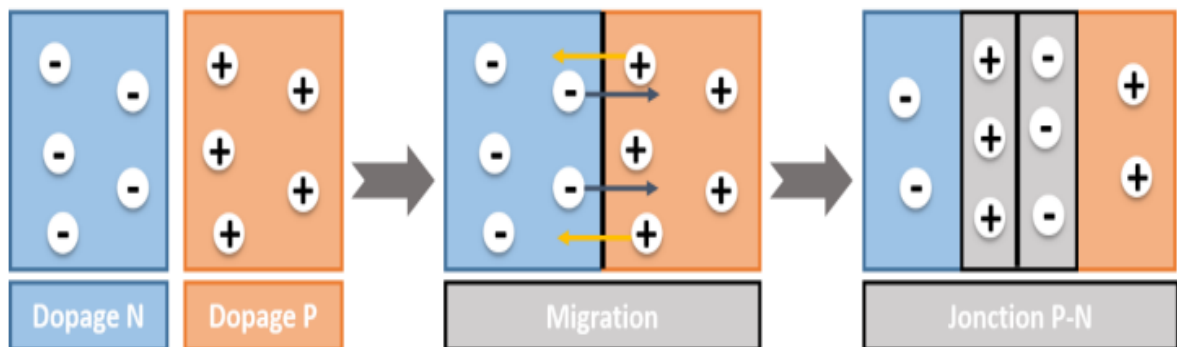


Figure I.9 Jonction P-N. [9]

Les électrons et les trous immigrés sont collectés par des contacts électriques à l'aide de deux électrodes déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Alors, un courant continu se créer. Une couche anti-reflet, déposée sur la couche exposée au soleil, permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface (accroître la quantité de lumière absorbée). [12-13]

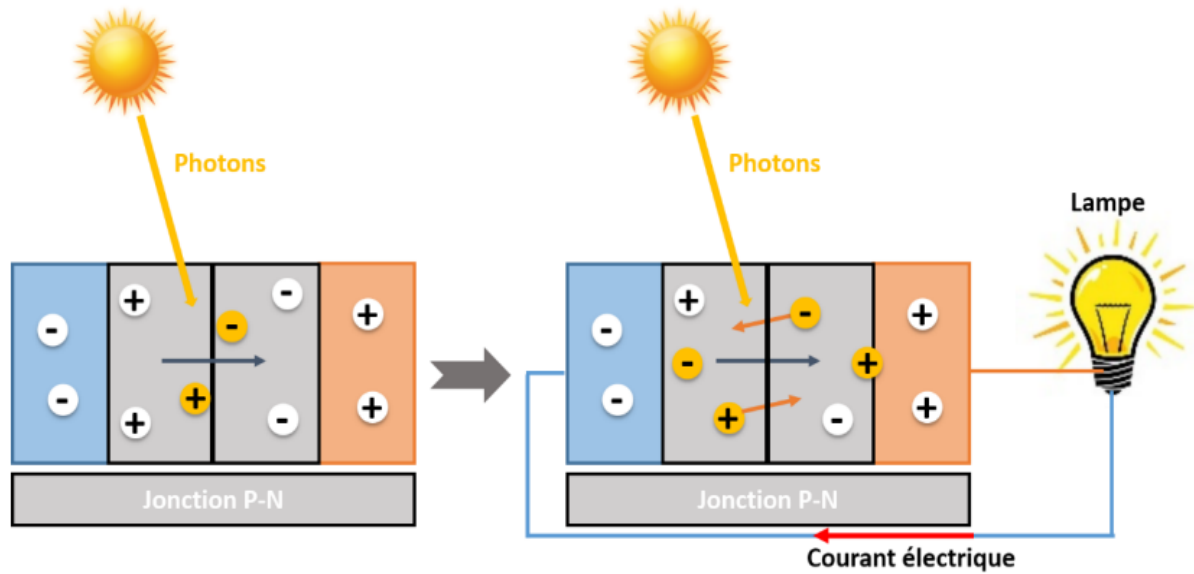


Figure I.10 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. [9]

I.6.5 Technologie d'une cellule photovoltaïque

I.6.5.1 1^{er} Génération : Cellules cristallines

Il existe deux types de cellules cristallines : les cellules monocristallines et les cellules polycristallines : [10-14]

- **Cellule monocristalline** : une cellule simple qui possède l'un des meilleurs rendements actuel puisque celui-ci est compris entre 17% et 20% avec un rapport performance/prix intéressant. Mais, son faible rendement sous éclairage réduit et son coût élevé restent un point noir.



Figure I.11 Cellules monocristallines. [10]

- **Cellule polycristallines** : moins chère que la monocristalline, elle possède un très bon rapport qualité/prix avec un rendement compris entre 16% et 18%. D'autre part, son performance diminue avec un faible éclairement.



Figure I.12 Cellules polycristallines. [10]

I.6.5.2 2^{ème} Génération : Cellules à couches minces

Dans ce cas, le semi-conducteur est directement déposé par vaporisation sur un matériau support (le verre par exemple) [9]. Ce sont les cellules de cette technologie que l'on retrouve dans les montres, calculatrices,...etc.

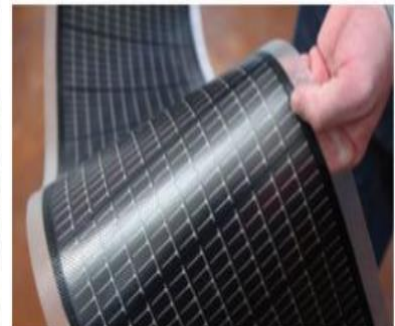
- **Cellule à amorphe silicium** : ce sont les cellules les moins performantes puisqu'elles ont un rendement compris entre 5% et 7%. Alors qu'elles sont moins coûteuses que la première génération et qu'elles fonctionnent très bien avec un éclairement faible. [10]
- **Cellule à tellure de Cadmium et à diséléniure de cuivre et d'indium** : cette technologie présente de bonnes performances avec un rendement va de 11% à 15%, mais sa qualité diminue sous éclairement direct. [10]



Cellules CdTe



Cellules CIS



Cellules a-Si

Figure I.13 Cellules à couches minces. [10]

I.6.5.3 3^{ème} Génération

Cette génération vise principalement à améliorer le rendement de cellules actuelles. Pour atteindre cet objectif, plusieurs technologies ont été développées, dont les plus importantes sont les suivantes. [10-14-15]

- Cellule tandem.
- Cellule pérovskite.
- Cellule organique.
- Cellule à concentration.

I.6.6 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Les caractéristiques électriques représentent généralement la relation entre deux grandeurs électriques (comme le courant et la tension) dans des conditions données et se présentent souvent sous la forme de courbes. [12]

I.6.6.1 Caractéristiques Courant-Tension

C'est une caractéristique fondamentale de la cellule solaire. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous des conditions climatiques constantes de la façon suivante : [12]

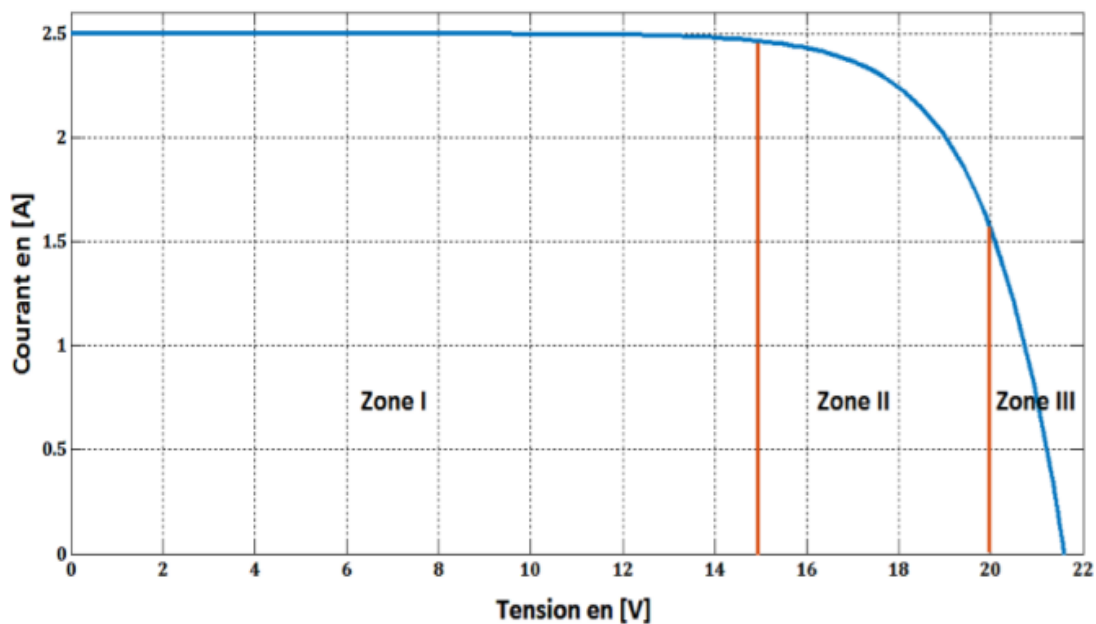


Figure I.14 Caractéristique $I=f(U)$ d'une cellule solaire. [12]

Selon la courbe $I=f(U)$, c'est la charge aux bornes de la cellule qui va déterminer le point de fonctionnement de la cellule PV, c'est à dire que la caractéristique fondamentale n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement. [10-12]

I.6.6.2 Caractéristiques Puissance-Tension

Cette caractéristique présente la puissance débitée par la cellule, c'est le produit du courant multiplié par la tension correspondante. Dans des conditions climatiques constantes, elle est représentée par la courbe dans la page suivante : [12]

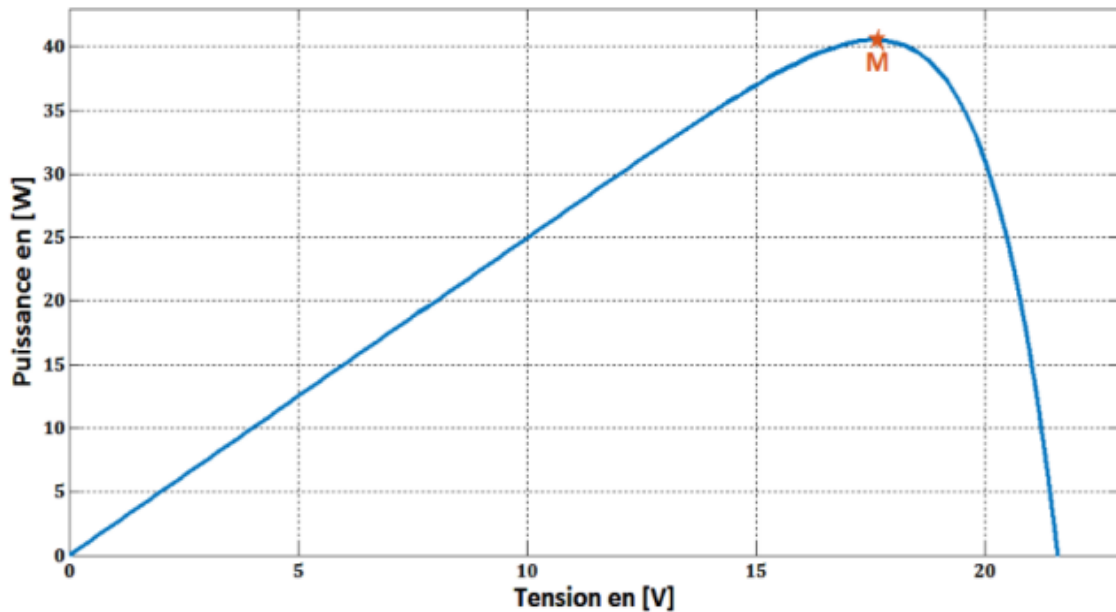


Figure I.15 Caractéristique $P=f(U)$ d'une cellule solaire. [12]

La figure I.15 démontre que la puissance générée est liée au point de fonctionnement, qui est déterminé par le courant et la tension imposées par la charge. Le point **M** représente le point optimal de fonctionnement, où la puissance maximale est atteinte.

I.6.7 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

De nombreux paramètres, appelés également paramètres PV, peuvent être utilisés pour caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont déduits des caractéristiques $I=f(U)$ et $P=f(U)$. En traçant ces deux caractéristiques (comme illustré dans la figure I.16), il est possible d'obtenir de nombreux paramètres physiques caractéristiques de la cellule. [10-12]

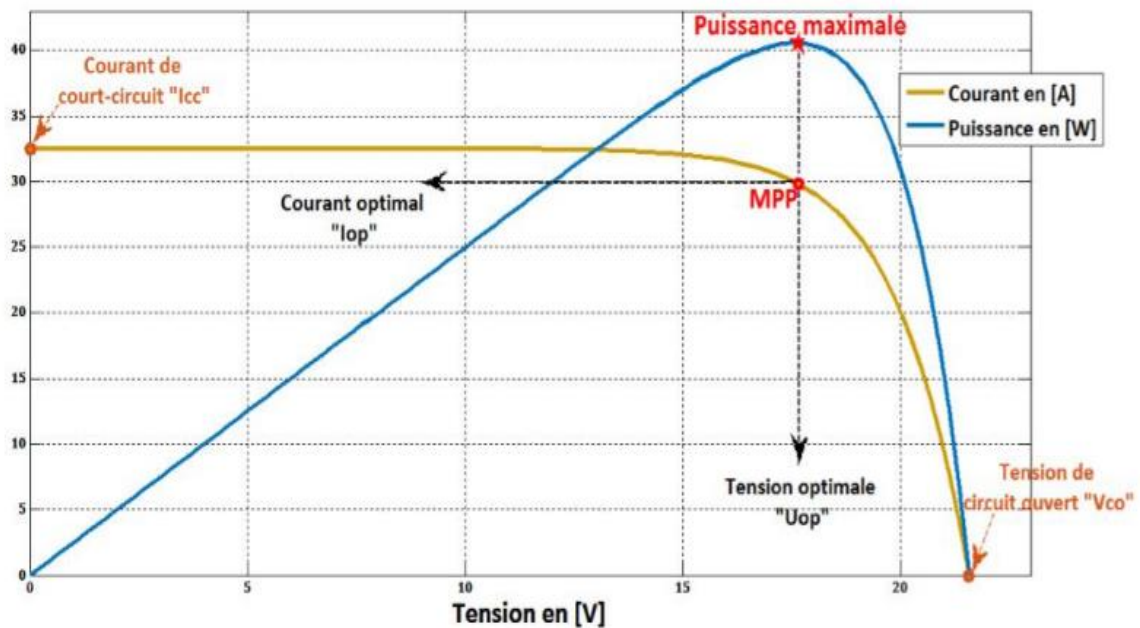


Figure I.16 Les caractéristiques électriques et les paramètres physiques d'une cellule solaire. [12]

Les premiers paramètres visibles sur la figure I.16 sont le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, le courant et la tension optimaux, ainsi que la puissance maximale.

a) Tension de circuit ouvert (UCO)

La tension de circuit ouvert correspond à la tension mesurée aux bornes de la cellule lorsqu'elle est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque les pôles + et - ne sont connectés à aucun autre circuit électrique (aucun courant ne traverse la cellule). Dans cette configuration, la cellule ne fournit aucune puissance.

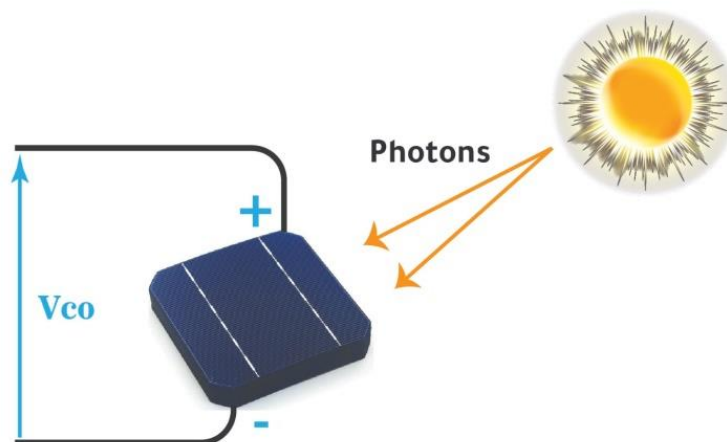


Figure I.17 Essai en circuit ouvert. [72]

b) Courant de court-circuit (I_{CC})

C'est le courant qui traverse la cellule PV lorsque celle-ci est en court-circuit, c'est-à-dire que lorsque le pôle positif est relié au pôle négatif (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule ($P=U \times I$) est nulle.

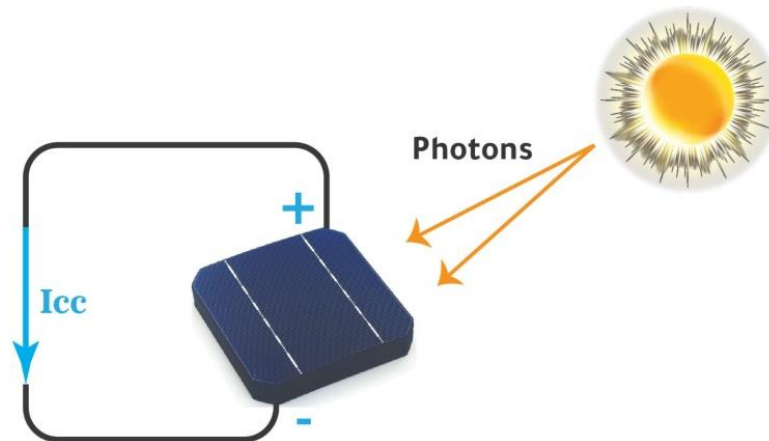


Figure I.18 Essai en court-circuit. [72]

c) Tension optimale (U_{OP})

C'est la tension qui correspond au maximum de la puissance de la cellule.

d) Courant optimal (I_{OP})

C'est le courant pour lequel la puissance est maximale.

e) Puissance maximale (P_{MAX})

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule PV sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale pour un point de fonctionnement, symbolisé par **MPP** : **Maximum Power Point**, défini par les coordonnées (I_{OP} , U_{OP}) de la courbe de caractéristique courant-tension, où I_{OP} soit compris entre 0 et I_{CC} et U_{OP} soit comprise entre 0 et U_{CO} .

f) Rendement (η)

Le rendement des cellules PV correspond à leur efficacité de conversion en puissance. Il est calculé en divisant la puissance maximale délivrée par la cellule par la puissance

lumineuse incidente (PIN), qui dépend elle-même de la surface de la cellule (S) et de l'éclairement incident (E)

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot U_{co}}{E \cdot S} \quad (\text{I-1})$$

Où : **FF** est le facteur de forme

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{max\ ideale}} = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot U_{co}} \quad (\text{I-2})$$

Pour améliorer le rendement, il est possible d'augmenter le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert. La valeur du rendement de conversion est un indicateur clé des performances de la cellule.

I.6.8 Paramètres climatiques d'une cellule PV

La fonction de la cellule photovoltaïque consiste à convertir le rayonnement solaire en électricité, en captant l'énergie des photons (irradiance) ainsi que la chaleur de l'atmosphère. Deux paramètres principaux influencent la conversion d'énergie de la cellule solaire, à savoir l'irradiance et la température. [9]

I.6.8.1 Influence de l'irradiance (E)

Les caractéristiques électriques de la cellule solaire variaient selon la quantité d'irradiance à laquelle elle était exposée, tandis que la température restait constante.

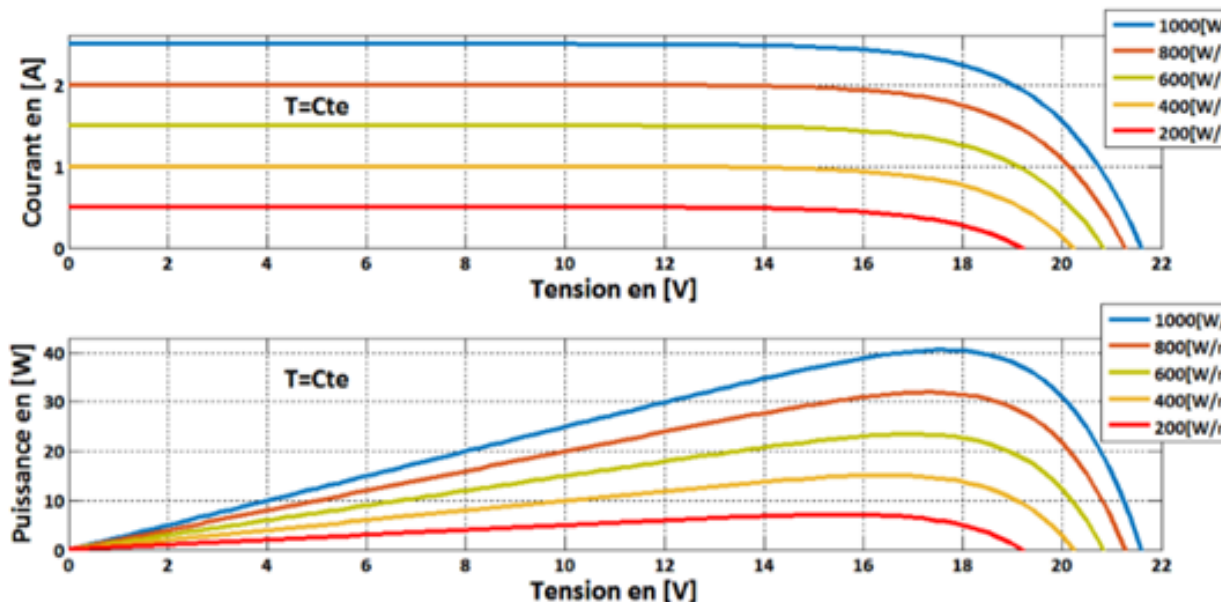


Figure I.19 Effet de l'éclairement sur les caractéristiques électriques d'une cellule PV pour T constante et E variable. [12]

Il en résulte que la puissance générée par la cellule solaire augmente proportionnellement à l'irradiance. Par conséquent, on peut conclure que le rendement d'une cellule photovoltaïque augmente significativement avec l'augmentation de l'irradiance, et inversement.

I.6.8.2 Influence de la température (T)

La figure I.20 illustre la variation des caractéristiques électriques d'une cellule solaire soumise à une température variable, mais à un éclairement constant.

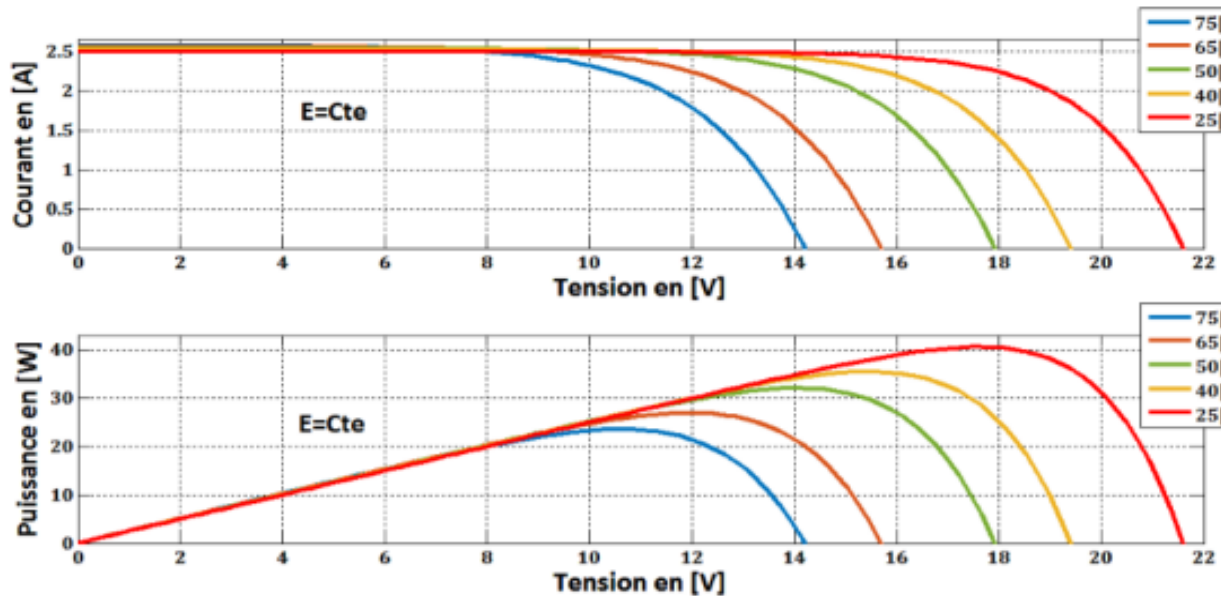


Figure I.20 Effet de l'éclairement sur les caractéristiques électriques d'une cellule PV pour T variable et E constant. [12]

En général, l'exposition d'une cellule solaire à plus de 1000[W/m²] d'irradiance affecte le rendement de la cellule d'un très faible pourcentage tandis que la température inférieure à 25[°C] déforme les caractéristiques électriques de la cellule et réduit ainsi son rendement. Il est donc préférable, dans la pratique, de placer la cellule solaire dans un environnement où la plage d'irradiance est de 100[W/m²] à 1000[W/m²], en plus d'une température comprise entre 25[°C] et 100[°C]. [13]

I.6.9 Regroupement des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques peuvent produire du courant électrique continu grâce à leur caractéristique de générateur dipolaire. Il est possible d'augmenter la production d'énergie en les connectant en série, en parallèle ou en combinaison des deux pour répondre aux exigences de la charge. [14-15]

I.6.9.1 Regroupement en série

Le montage de cellules PV en série est l'option permettant d'additionner les voltages de chaque cellule en préservant un ampérage identique. Le pôle positif d'une cellule est relié au pôle négatif de la cellule suivante. Ce type de branchement s'effectue avec des cellules de même ampérage. En effet, si deux cellules d'ampérage différent sont reliées, l'ensemble s'aligne sur l'ampérage le plus faible. Un tel montage influe seulement sur le voltage. [14-15]

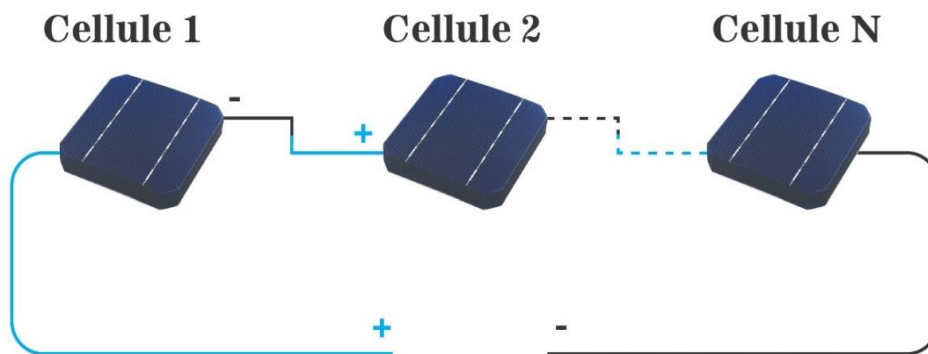


Figure I.21 Regroupement en série des cellules photovoltaïques. [72]

Où : N est le nombre de cellules connectées en série.

L'intensité maximale du courant de court-circuit obtenue (I_{CC}^T), qui traverse toutes les cellules connectées en série, est limitée par celle de la cellule la plus faible. Pour la tension résultante de circuit ouvert (V_{oc}^T), elle est égale à la somme de tensions appliquées aux bornes de chaque cellule. L'équation I.3 résume les caractéristiques électriques d'association de S cellules [12] :

$$I_{CC}^T = P \cdot I_{cc} \text{ avec } V_{co}^T = S \cdot V_{co} \quad (\text{I-3})$$

I.6.9.2 Regroupement en parallèle

Le raccordement en parallèle des cellules photovoltaïques augmente l'intensité tout en conservant la même tension. Cela affecte l'ampérage et non la tension. Les bornes positives et les bornes négatives de chaque cellule sont connectées ensemble. [14-15]

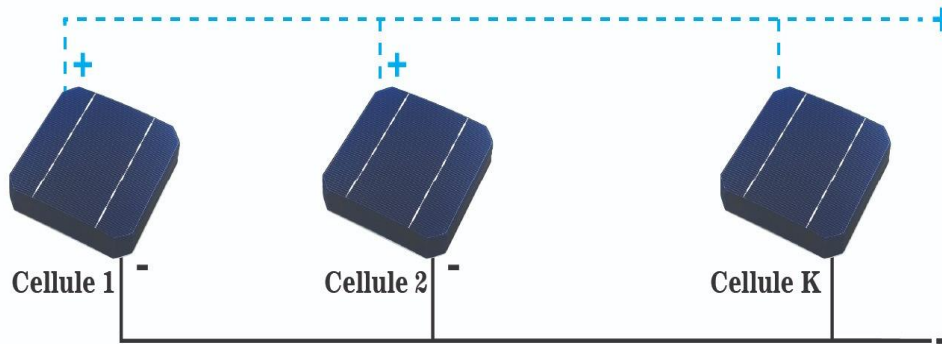


Figure I.22 Regroupement en parallèle des cellules photovoltaïques. [72]

Où : K est le nombre de cellules connectées en parallèle.

La tension globale de circuit ouvert (V_{oc}^T) est identique à celle appliquée aux bornes de chaque cellule. Les intensités des courants de court-circuit produits dans chaque branche s'ajoutent mathématiquement afin de donner l'intensité maximale (I_{cc}^T) qui circule dans le circuit. Alors, les caractéristiques électriques de combinaison de P cellules en parallèle sont résumées par l'équation suivante [12] :

$$I_{CC}^T = P \cdot I_{cc} \text{ avec } V_{co}^T = V_{co} \quad (\text{I-4})$$

I.6.9.3 Regroupement hybride

Le montage hybride de cellules photovoltaïques associe la connexion en série et en parallèle. Il consiste en un parallélisme de deux ou plusieurs groupes de cellules reliées en série. Ce type de raccordement a un impact sur l'intensité et la tension. [14-15]

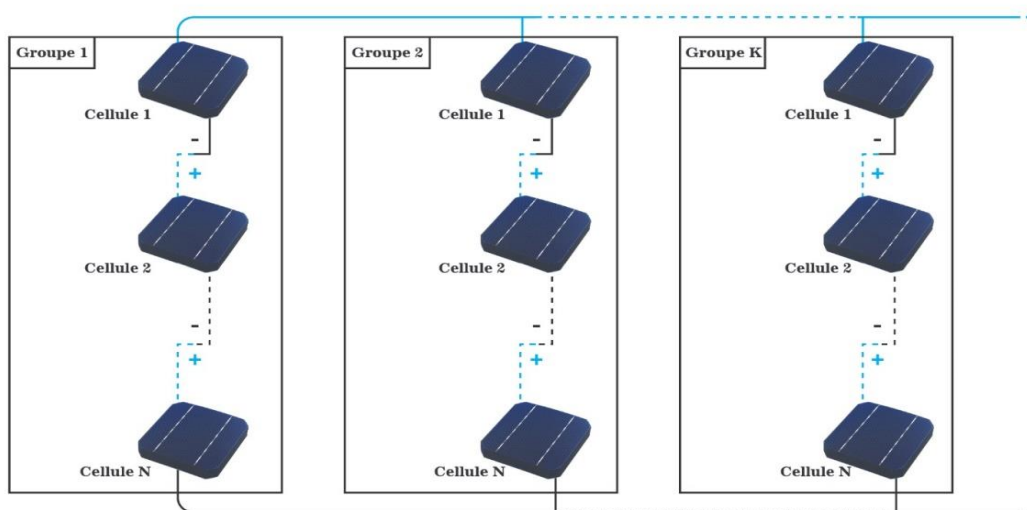


Figure I.23 Montage hybride des cellules photovoltaïques. [72]

La tension maximum obtenu (V_{Toc}^T) est le même que celle aux bornes de chaque groupe, chacun de ces groupes est soumis à un voltage qui est la somme des tensions produites par ses cellules constitutives. Pour protéger contre les problèmes de surcharge et surintensité, il faut que tous les groupes génèrent le même voltage.

L'intensité de courant maximale résultante (I_{CC}^T) est la somme mathématique de l'intensité produite par chaque groupe. Toutes les cellules formant un groupe sont traversées par la même intensité qui est imposée par la cellule possédant le plus faible ampérage. Alors, les caractéristiques électriques de combinaison hybride de cellules sont résumées par l'équation suivante [12] :

$$I_{CC}^T = N_p \cdot I_{cc} \text{ avec } V_{co}^T = N_s \cdot V_{co} \quad (\text{I-5})$$

I.6.10 Circuit équivalent d'une cellule

Une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série R_s et R_{sh} comme le montre le schéma équivalent de la figure suivant [42] :

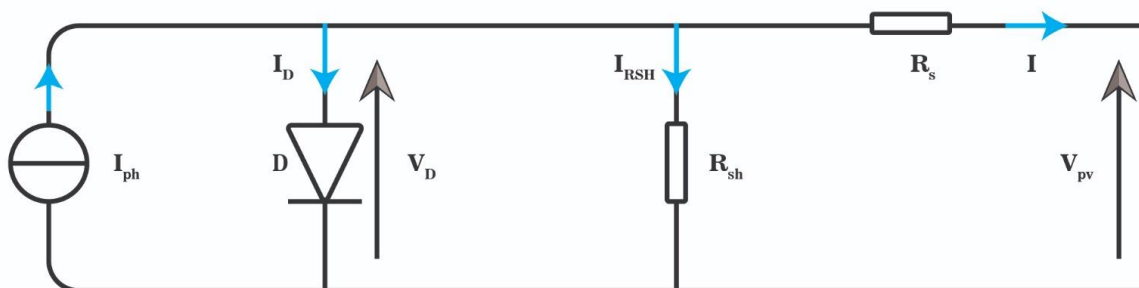


Figure I.24 Circuit équivalent d'une cellule PV. [72]

La résistance série d'une cellule est déterminée par plusieurs facteurs, notamment la résistance du semi-conducteur utilisé, la résistance de contact des grilles collectrices et la résistivité de ces grilles. Elle correspond à la résistance interne de la cellule. En revanche, la résistance shunt est causée par un courant de fuite au niveau de la jonction.

I.7 Système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est un dispositif qui convertit l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique utilisable. Il est généralement composé de panneaux solaires

photovoltaïques, d'un régulateur de charge, d'un onduleur et d'une batterie de stockage. Les panneaux solaires photovoltaïques sont constitués de cellules solaires qui absorbent la lumière du soleil et produisent de l'électricité à courant continu. Le régulateur de charge est utilisé pour protéger la batterie contre une surcharge ou une décharge excessive, tandis que l'onduleur est utilisé pour convertir l'électricité à courant continu en électricité à courant alternatif, qui peut être utilisée pour alimenter des appareils électriques ou être injectée dans le réseau électrique. La batterie de stockage est utilisée pour stocker l'énergie électrique produite par le système photovoltaïque pour une utilisation ultérieure, lorsque la production d'électricité solaire est faible ou inexistante. Les systèmes photovoltaïques sont couramment utilisés pour alimenter des maisons, des entreprises, des installations industrielles et des équipements éloignés de tout réseau électrique. [10-12]

I.7.1 Le générateur photovoltaïque

Un ou plusieurs modules photovoltaïques forment le champ photovoltaïque (figure I.25) Ils transforment l'énergie des rayons lumineux en énergie électrique. La durée de vie des modules solaires photovoltaïques est estimée de 20 à 30 ans. [46]

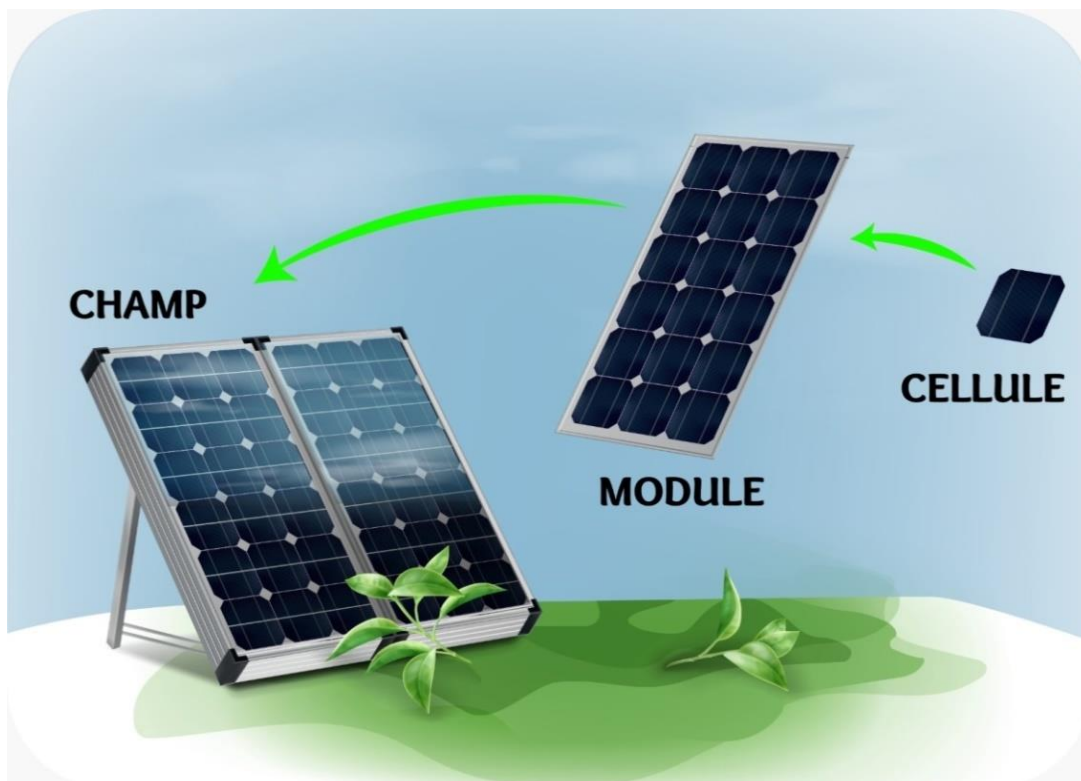


Figure I.25 Assemblage de cellules, du module au Générateur PV. [72]

L'emplacement du générateur photovoltaïque devra respecter les contraintes suivantes [46]:

- Orientation et inclinaison : les modules doivent être orientés au sud dans l'hémisphère Nord et au nord dans l'hémisphère Sud.
- Exposition aux rayons solaires toute la journée en toute saison.
- Accès facile pour le nettoyage.
- Proximité avec la régulation, le stockage et les récepteurs.
- Fixations solides pour résister aux vents : les modules sont généralement fixés soit au sol, soit en toiture, soit en façade.

I.7.2 Les types des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques se présentent sous trois formes : les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés au réseau. Les deux premiers sont utilisés dans des régions éloignées et isolées, car ils sont indépendants du réseau électrique de distribution. [10, 12]

I.7.2.1 Systèmes connectés au réseau

Les systèmes de production d'énergie PV connectés à un réseau sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau. Il est toujours possible d'utiliser ces systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau [10, 12].

I.7.2.2 Systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride combinent au moins deux sources d'énergie renouvelable avec une ou plusieurs sources d'énergie classique. Bien que les sources d'énergie renouvelable et classique ne fournissent pas une puissance constante, leur combinaison permet d'obtenir une production électrique continue en tirant parti de leurs complémentarités. Les différentes sources d'un système hybride peuvent être reliées de deux manières pour assurer une alimentation en électricité continue ou alternative [10, 12].

I.7.2.3 Systèmes autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont les plus courants et les plus simples ; ils fonctionnent de manière autonome sans nécessiter d'autres sources d'énergie [10, 12].

I.7.3 Système de conditionnement de puissance

Le système de conditionnement de puissance est un système (une unité) intermédiaire d'adaptation destiné pour assurer le fonctionnement d'une charge hydraulique en fonction de la puissance PV disponible. [5]

Selon la nature de la charge hydraulique (DC ou AC), l'unité de conditionnement est plus souvent un convertisseur statique de type hacheur ou onduleur, en plus d'une batterie d'accumulation qui compense l'énergie produite par le système PV en cas de panne ou d'absence de rayonnement solaire dû à l'obscurité ou aux mauvaises conditions météorologiques. [5-17]

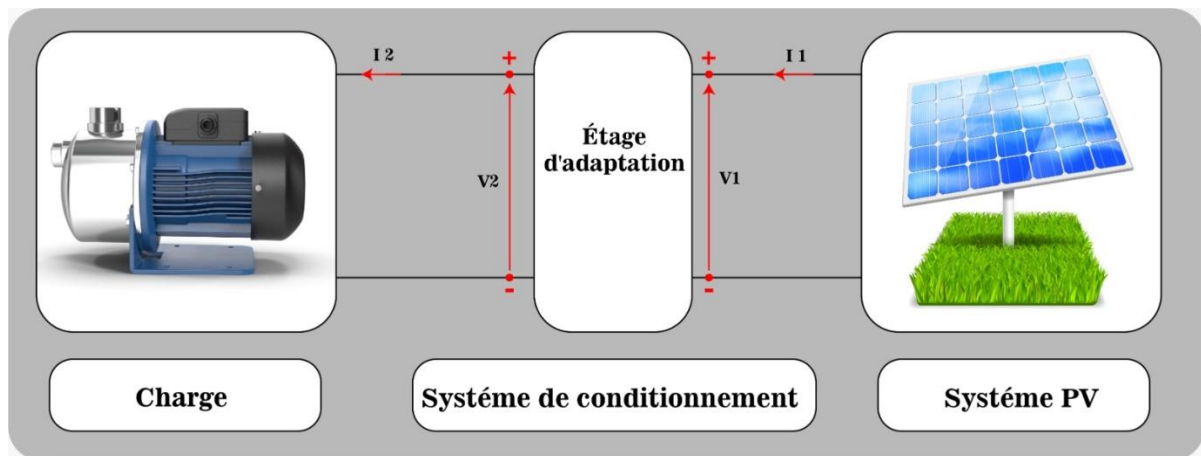


Figure I.26 Rôle du système de conditionnement de puissance. [72]

I.7.3.1 Le convertisseur DC/DC (hacheur)

Le convertisseur, appelé souvent « hacheur », apparaît dans toutes les configurations sauf pour le système à couplage direct ou pour certains cas d'applications où la charge est à courant alternatif. C'est un composant essentiel dans les systèmes photovoltaïques y compris le pompage solaire photovoltaïque. Il permet d'adapter la tension à des récepteurs fonctionnant à une tension continue différente à celle du panneau photovoltaïque ; et en plus, de maximiser la puissance issue de ce dernier. Le hacheur peut être réalisé avec un interrupteur électronique commandable tel que les thyristors GTO ou des transistors à effet de champ bipolaire associé à une diode de roue libre [49].

Les trois configurations les plus courantes du hacheur sont :

- **Convertisseur abaisseur « BUCK ».**
- **Convertisseur élévateur « BOOST ».**
- **Convertisseur abaisseur-élévateur « BUCK-BOOST ».**

I.7.3.2 Le convertisseur DC/AC (onduleur)

Un convertisseur DC/AC (ou onduleur) est un dispositif qui assure la conversion de la tension continue fournie, soit directement par les panneaux photovoltaïques ou par les batteries à la sortie du convertisseur DC/DC (hacheur), pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant à une tension alternative (moteur ou réseau électrique à courant alternatif). En plus, il peut aussi assurer la commande de maximisation de la puissance du générateur photovoltaïque (MPPT). Le choix de l'onduleur dépend des caractéristiques électriques de la pompe à alimenter (puissance et tension) [49].

I.7.4 Protection des modules photovoltaïques

Lors de la conception des installations photovoltaïques, leur protection électrique doit être élaborée afin d'augmenter leur durabilité en évitant les défauts destructeurs dus au mauvais raccordement et au mauvais fonctionnement des générateurs photovoltaïques. Cela se fait en utilisant deux types de protection dans les installations photovoltaïques : la diode by-pass et la diode anti-retour, comme illustré à la Figure (I.27)

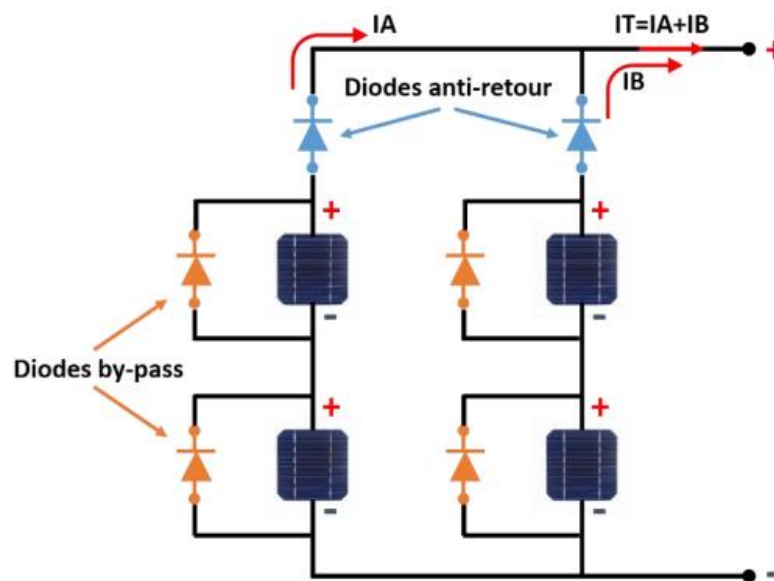


Figure I.27 Protection d'un champ photovoltaïque composé de N_{st} strings branchés en parallèle comportant chacun de modules associés en série. [72]

I.7.4.1 Diodes de by-pass

Les diodes by-pass sont conçues pour protéger les cellules PV combinées en série. Elles peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène, évitant ainsi l'apparition de points chauds (phénomène de hot spot) et la destruction des cellules mal éclairées [9-13].

Pratiquement, La diode by-pass est installée en dérivation et en polarité inverse (assemblage antiparallèle) avec une ou plusieurs cellules. Si une cellule ou un groupe de cellules est ombragé, le courant passera par la diode by-pass, ce qui permet ainsi d'éviter un échauffement trop intense de ces cellules. En fait, une diode by-pass est installée en anti-parallèle à une branche de 18 cellules au silicium cristallin associées en série [9].

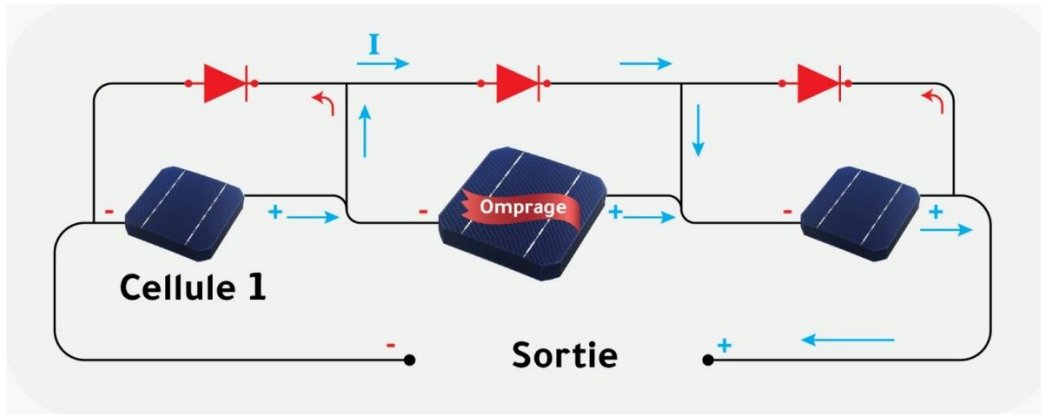


Figure I.28 Fonctionnement des diodes by-pass. [72]

I.7.4.2 Diodes anti-retours

La diode anti-retour, c'est un dispositif unidirectionnel développé pour faire la protection de cellules PV regroupées en parallèle. Son rôle est d'empêcher le phénomène du courant de retour (le courant négatif) dans les modules. Le phénomène du courant de retour peut apparaître lorsque deux cellules ou plus de voltage différent sont branchées en parallèle, ou bien si une cellule alimente une charge d'impédance très élevée sous mauvaises conditions météorologiques (faible éclaircissement et haute température) [9-13].

En pratique, la diode anti-retour est mise en série avec une branche de cellules liées en série afin d'éviter chaque courant négatif pouvant la traverser en raison du déséquilibre de tension entre les branches du module PV ou bien entre le module lui-même et la charge [9].

I.7.5 Avantages et Inconvénients des systèmes photovoltaïques

Bien que plusieurs sources de production d'énergie électrique soient disponibles, le photovoltaïque est l'un des plus importants en raison de sa grande variété d'options. Cependant, certains obstacles ont freiné son développement. Ci-dessous, nous examinerons les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques. [10-15]

Les avantages :

- Maintenance et les réparations sont réduites à presque rien pour la partie photovoltaïque et à peu de chose pour l'électronique associée.

- Equipement de production peut presque toujours être installé à proximité du lieu de consommation, évitant ainsi les pertes en ligne.
- Aucun mouvement, pas de pollution directe ou indirecte, aucun déchet, aucune perturbation pour l'environnement de proximité, c'est un système purement propre et écologique.
- Il est totalement modulable et la taille des installations peut être facilement ajustée selon les besoins ou les moyens.
- Il est exploitable pratiquement partout, la lumière du soleil étant disponible dans le monde entier.

Les inconvénients :

- Les taux de rendement des panneaux photovoltaïques sont encore relativement faibles.
- Coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.
- Fabrication de panneaux photovoltaïques à haute technologie nécessite énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.

I.8 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, il apparaît que la technologie du pompage photovoltaïque présente un grand potentiel d'amélioration en termes de contrôle, étant donné qu'elle résulte principalement de la combinaison de différentes technologies (photovoltaïque, motopompe, etc.) avec des techniques de contrôle modernes. Cette caractéristique permet une grande variété d'applications de la technologie de pompage solaire dans de nombreux domaines, avec des performances élevées et des coûts réduits.

Nous avons débuté notre étude en nous intéressant à l'énergie solaire et aux différents types de rayonnements solaires, notamment le rayonnement direct, diffus et l'albédo. Nous avons également examiné de manière générale l'énergie solaire photovoltaïque ainsi que les différentes manières d'utiliser un système solaire photovoltaïque (autonome, hybride, raccordé au réseau), en soulignant les avantages et inconvénients de chaque méthode dans l'utilisation de l'énergie photovoltaïque.

II

CHAPITRE II

LES SYSTEMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

Nombre Des Pages : 24

II.1 Introduction

Le développement d'un système de pompage solaire autonome, fiable et performant représente une solution pratique et économique pour la pénurie d'eau, en particulier dans les régions sahariennes et reculées. Un système photovoltaïque est considéré comme intéressant s'il est facile à installer, possède une autonomie satisfaisante et une fiabilité de service exceptionnelle.

Dans ce chapitre, nous concentrons sur les éléments clés pour la mise en place d'une station de pompage solaire, en incluant la planification des dimensions et en sélectionnant les matériaux adéquats en termes de quantité et de qualité.

Notre exemple pratique sera dans une région de la wilaya D'EL-OUED où nous allons dimensionner le système Photovoltaïque de pompage autonome.

II.2 Système de pompage solaire

Le système de pompage solaire (PS) est une combinaison de différentes technologies telles que la photovoltaïque, l'électronique de puissance, etc., qui sont interconnectées pour permettre le contrôle du pompage d'eau en fonction de la quantité de rayonnement solaire disponible. [31]

Ce système est particulièrement utile dans les régions où l'accès à l'eau est limité ou difficile, comme les zones agricoles ou les zones les plus isolées et inaccessibles du territoire où la construction de réseaux et d'infrastructures adéquats est impossible.

En temps où le monde entier passe au solaire, l'utilisation de l'énergie solaire dans les systèmes de pompage de l'eau peut considérablement aider et accélérer le développement de l'agriculture dans les pays africains et dans de nombreuses autres régions éloignées pauvres, ce concept est connu sous le nom d'irrigation solaire et est utilisé dans de nombreuses régions en présent temps. [16]

II.3 Architecture d'un système de pompage solaire

Le système de PS est raccordé avec le générateur photovoltaïque par l'intermédiaire d'un système de conditionnement qui assure la transformation de l'énergie et son contrôle. [5-17] Selon ce principe, le système de PS peut être architecturé de la façon suivante :

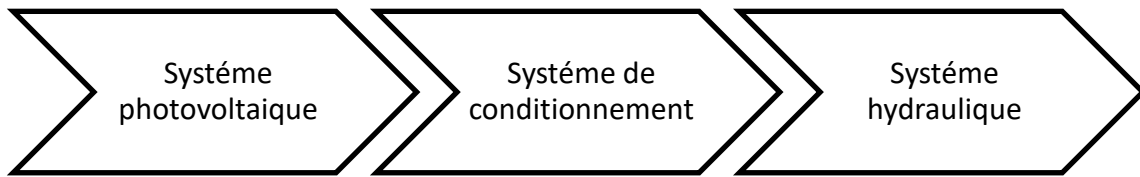


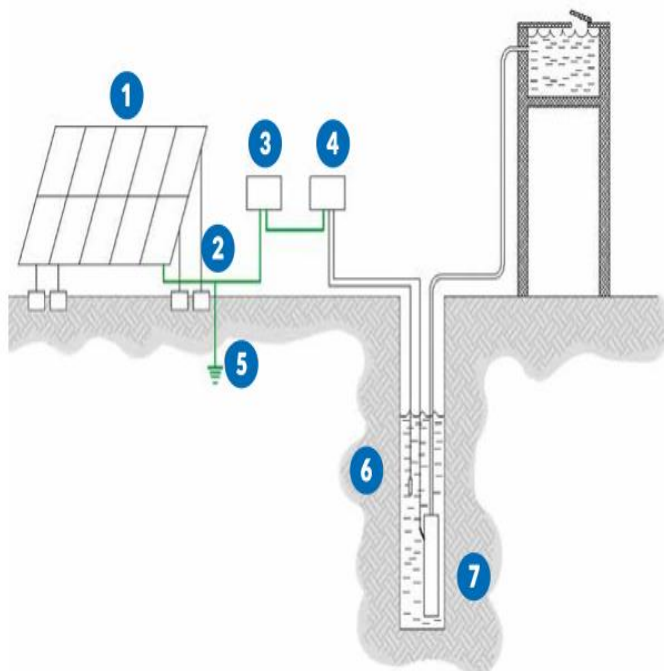
Figure II.1 Architecture d'un système de pompage solaire [5].

II.4 Qu'est-ce qui compose un système de pompage solaire ?

L'architecture du système de pompage solaire, représentée dans la figure II.2, peut donner lieu à différents modèles qui présentent des caractéristiques importantes, telles que les suivantes [2] :

- Technologies utilisées qui relient fonctionnellement les différents composants du système entre eux.
- Appareils et les machines approuvés qui constituent l'infrastructure de ce système.
- But par lequel le système de pompage solaire est conçu.
- Capacité économique.

En général, la construction du système de PS peut se faire selon le schéma suivant qui est la représentation de base du système de pompage solaire.



- 1) **Parc de panneaux solaires.**
- 2) **Support de panneaux** avec fondations et système d'accrochages antivol.
- 3) **Coffret de protection avec fusible**, coupe-circuit général et parafoudre.
- 4) **Contrôleur de pompe** ou Onduleur solaire de pompage.
- 5) **Piquet de terre** connecté au circuit de terre général regroupant les panneaux, leur support, coffret et pompe
- 6) **Sonde de sécurité niveau bas eau** (arrête immédiatement la pompe si le puits est vide).
- 7) **Pompe submersible.**

Figure II.2 Construction d'un système de pompage solaire [5].

Remarque ! Contrairement au pompage traditionnel, le pompage solaire nécessite l'utilisation de panneaux photovoltaïques, d'un convertisseur et d'une pompe adaptée.

II.5 Principe de fonctionnement d'un système de pompage solaire

Le système PV produit un courant continu sous l'effet des rayonnements solaires, et pour l'utiliser pour alimenter le groupe motopompe, un système de conditionnement de puissance intervient en utilisant un variateur de fréquence (convertisseur statique) pour convertir ce courant continu en courant alternatif. [31]

Grâce à la technologie de commande utilisée, l'unité de conditionnement peut également ajuster la fréquence et la tension de l'énergie disponible pour les adapter à l'électropompe. Ainsi, le système électropompe peut transporter de l'eau depuis une source peu profonde (puits, forage) à une hauteur plus élevée à la surface du sol (réservoir d'eau). Afin de pouvoir utiliser cette eau pour diverses applications, un système d'infrastructure hydraulique est doté de réseaux de distribution d'eau. [31]

Actuellement, les systèmes de PS sont utilisés en deux modes de fonctionnement, avec et sans batteries (au fil du soleil). La technologie sans batteries possède quelques inconvénients, son principal défaut est d'avoir un débit d'eau qui ne dépend que de l'ensoleillement au cours de la journée, pour cela, une batterie est utilisée pour résoudre ce problème [15]. Pour les deux modes de fonctionnement, il est recommandé d'utiliser un régulateur avant l'électropompe pour garantir sa protection contre les dégâts électriques (surcharge, décharge, surintensité, etc.) et prolonger ainsi sa durée de vie.

II.5.1 Pompage solaire au fil du soleil

Le système de pompage au fil du soleil ne nécessite pas de batteries, le stockage se fait de manière hydraulique (au lieu de stocker l'électricité dans un parc à batterie, l'eau est stockée dans un réservoir). Dont, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol qui va ensuite distribuer selon les besoins. [5]

Ce mode de fonctionnement est une solution très économique, mais l'électropompe ne fournit pas un débit constant et ne fonctionne pas sous un certain niveau d'éclairage (au début et à la fin de la journée). De plus, son rendement est moins élevé en dehors des heures d'ensoleillement optimal.

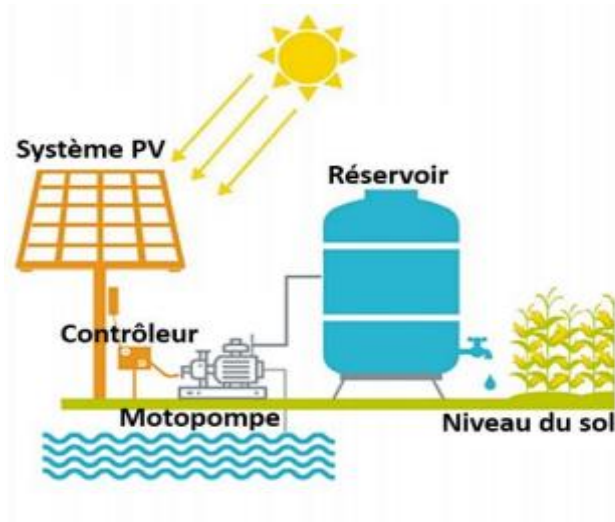


Figure II.3 Mode de fonctionnement sans batterie [15].

II.5.2 Pompage solaire avec batterie

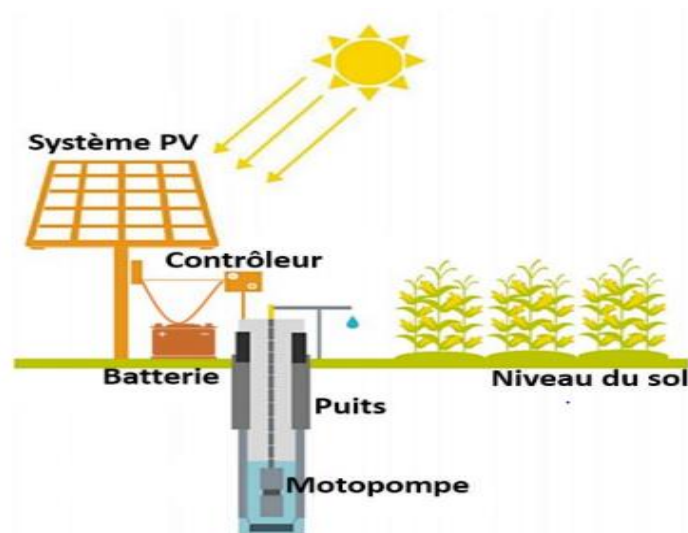


Figure II.4 Mode de fonctionnement avec batterie [15].

En réalité, le rayonnement solaire frappe la terre pendant des heures bien déterminées, réduisant ainsi l'efficacité du pompage PV en dehors des heures d'ensoleillement. Afin d'assurer la continuité du pompage PV, un système de stockage d'énergie est nécessaire. Un parc à batterie est une solution permettant de compenser l'absence de rayonnement solaire. Donc, le mode de fonctionnement avec batterie permet d'assurer une autonomie énergétique. [5]

II.5.3 Les avantages et les inconvénients de ces méthodes de pompage

Tableau II.1 Les avantages et inconvénients des pompages sans batteries et avec batteries [19-20].

Méthodes de pompage	Avantages	Inconvénients
Pompage sans batteries	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Economie du coût des batteries et par conséquent leur maintenance. ▪ Système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux. ▪ Meilleur rendement énergétique. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Le débit de la pompe n'est pas constant et le rabattement du forage peut-être trop élevé durant certaines périodes de la journée. ▪ Perte d'énergie au début et à la fin de la journée.
Pompage avec batterie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Débit de la pompe régulier et à pression fixe. ▪ Possibilité de pomper l'eau lorsque le soleil est absent. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Changement des batteries tous 5 à 7 ans. ▪ Coût élevé d'entretien et maintenance des batteries. ▪ Coût élevé du système photovoltaïque.

II.6 Qualité de critère de fonctionnement

Toutefois, le système de PS doit satisfaire à certains critères de qualité pour garantir un fonctionnement optimal : *fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité*. [21]

▪ Fiabilité

Le système de PS est fiable, c'est à dire l'aptitude du système à accomplir sa fonction dans des conditions existantes (météorologiques, propriétés des constituants, ...etc) pendant une durée donnée. Alors, la bonne fiabilité assure l'absence de pannes qui dépend non seulement de composants et de leur qualité, mais aussi d'autres aspects du système comme la capacité de la ressource en eau.

- **Disponibilité**

Dans le PS, la disponibilité s'agit de la capacité du système à être en état d'accomplir sa mission requise à un instant donné quel que soit les conditions dans lesquelles le système se trouve.

- **Maintenabilité**

Dans des conditions de fonctionnement, le système de PS soit maintenable s'il est capable d'être maintenu et de bien rétablir son état de fonctionnement normal et correct en des limites de temps désirées lorsque la maintenance est accomplie. Alors, la bonne maintenabilité assure la rapidité de dépanné.

- **Sécurité**

La sécurité du système de PS, c'est l'aptitude de bien éviter, dans les conditions d'exploitation, de faire apparaître des évènements critiques et catastrophiques. Ainsi, la bonne sécurité assure une importante durée de vie du système de PS et la qualité de sa production.

II.7 Système d'électropompe

Un système d'électropompe, c'est un groupe électromécanique, destiné à pomper l'eau, composé d'une pompe hydraulique entraînée par un moteur électrique [25]. Dans ce groupe, il est possible d'avoir soit un ensemble fixe, soit un ensemble mobile qui peut être monté sur une remorque ou un camion. Il contient généralement des dispositifs électroniques et mécaniques pour contrôler la pression, le débit et d'autres facteurs.

II.7.1 Pompe hydraulique

Le dispositif central d'un système d'extraction d'eau est la pompe, qui se charge de transporter les liquides d'un endroit à basse pression à un autre où la pression est plus élevée. Sur le plan physique, la pompe transforme l'énergie mécanique en énergie hydraulique.

II.7.1.1 Pompes centrifuges ou volumétriques

Le choix d'une pompe centrifuge ou volumétrique, ça dépend de la pression de l'eau, ainsi que des propriétés électriques et mécaniques du moteur électrique entraînant la pompe [5].

a) Pompes volumétriques

concernent la famille utilisant les variations de volume du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression de telle sorte que le fluide est d'abord aspiré par l'accroissement d'un volume puis refoulé par diminution de ce même volume. Les pompes volumétriques les plus répandues sont les pompes à pistons, à palette et à engrenage [5].

Leurs avantages clés sont les suivants : [5-25]

- Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à 5[m³ /h]) et aux grandes hauteurs.
- Elles ont de bons rendements, et les pompes volumétriques de surface sont auto-amorçantes.
- Couple de démarrage d'une pompe volumétrique (aller de 3 à 5 fois le couple nominal) et la caractéristique $I=f(V)$ de ce type de pompe font que son fonctionnement en direct sur un panneau PV n'est pas économiquement viable. Pour pallier le problème de surdimensionnement du générateur résultant de cette inadaptation, un adaptateur d'impédance est utilisé pour permettre un rendement aussi élevé que possible de l'ensemble du système.



Figure II.5 Pompe volumétrique [26].

b) Pompes centrifuges

Concernent la famille utilisant les variations de vitesse du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression de telle sorte que l'énergie mécanique du moteur est transmise au fluide sous forme d'énergie cinétique. L'énergie cinétique est ensuite transformée en énergie de pression [5].

Les caractéristiques des pompes centrifuges sont les suivantes: [5-25]

- Couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage, cela est particulièrement intéressant dans le cadre de l'utilisation de panneaux PV car la pompe tourne même sous très faible ensoleillement.
- Grâce à son extrême simplicité, le système peut être couplé directement sur une machine tournante comme moteur électrique.
- Il n'y a pas ou presque pas d'aspiration : elles doivent être amorcées pour fonctionner, de manière à éviter tout risque de destruction si fonctionnement à sec. Certaines sont autoamorçantes.
- Elles peuvent être aussi bien immergées que disposées en surface.
- Plusieurs étages (cage + roue à ailettes) peuvent être superposés pour obtenir des grandes pressions.



Figure II.6 Pompe centrifuge [26].

II.7.1.2 Pompes de surface ou Immergées

Le choix d'une pompe de surface ou immergée se fera en fonction des caractéristiques hydrauliques de l'installation envisagée (débit, hauteur manométrique totale, ...etc.) et de conditions particulières d'utilisation (puits, forage, pompage d'eau, ...etc.). [5]

a) Pompes de surface

Le terme surface définit la position d'une pompe par rapport au liquide à pomper. Elle est dite pompe de surface, car prévue pour être posée en dehors du liquide à aspirer. Cette classe de familles est bien adaptée à la mise sous pression. [25]

En fait, Une pompe de surface ne pourra pas relever l'eau au-delà d'un maximum théorique de 10.33 mètres (car elle fonctionne par aspiration et la hauteur de la colonne d'eau est donc proportionnelle à la dépression, qui ne peut pas dépasser la valeur de la pression atmosphérique!), au-delà de cette hauteur, il faut s'orienter vers une pompe immergée. [5]



Figure II.7 Pompe de surface [26].

b) Pompes immergées

C'est une pompe qui est directement mise dans l'eau (dans un puits ou un forage) afin de refouler l'eau à la surface. Une pompe immergée est souvent conçue pour fonctionner avec des panneaux solaires PV. [25]

Avec une pompe immergée, l'eau peut être extraite à plusieurs centaines de mètres. Dans un système de PS, la famille de pompes centrifuges est généralement à caractère immergée est

la plus utilisée puisque elle possède une forme plus adaptée aux puits et qui peuvent débiter à forte pression. [5]



Figure II.8 Pompe immergée [26].

II.7.2 Moteur électrique

Pour fonctionner, une pompe a besoin d'une source d'énergie mécanique. Ce besoin est généralement comblé par un moteur. Il existe deux types de moteurs : les moteurs à courant continu et les moteurs asynchrones.

II.7.2.1 Moteur à courant continu

L'énergie électrique appliquée à un moteur est transformée en énergie mécanique en variant le sens du courant circulant dans un induit (habituellement le rotor) soumis à un champ magnétique produit par un inducteur (habituellement le stator). La commutation du courant dans le rotor d'un moteur à courant continu est effectuée à l'aide de balais composés de charbon et de graphite ou par commutation électronique. [27]

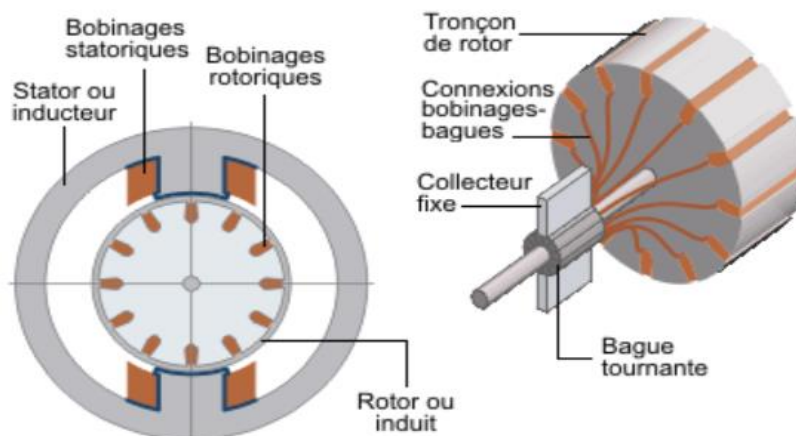


Figure II.9 Moteur à courant continu [28].

Le couplage est direct ou avec adaptation du générateur par un hacheur adaptateur de puissance. [29]

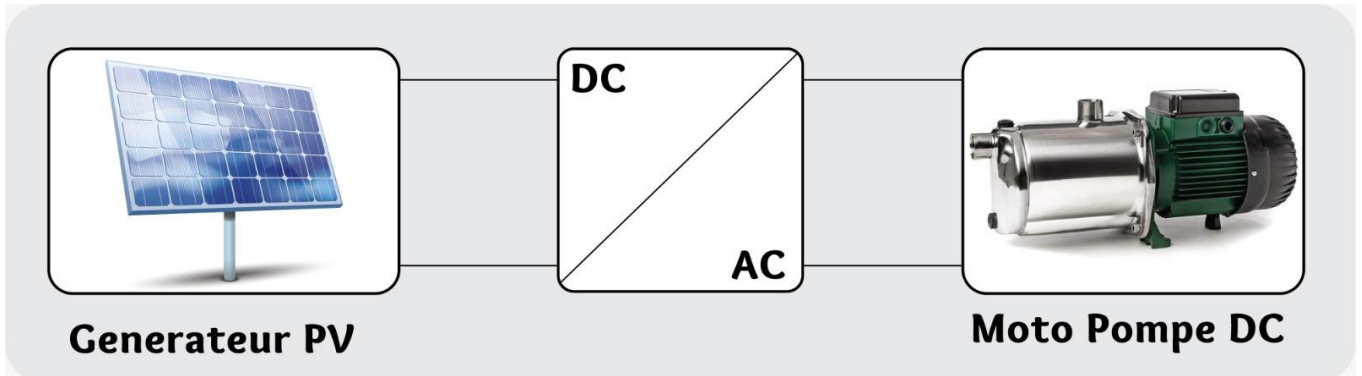


Figure II.10 Schéma synoptique simplifié du pompage PV par motopompe DC. [72]

II.7.2.2 Moteur à courant alternatif

Pour les applications de faible et moyenne puissance (jusqu'à quelques kilos Watts), le réseau monophasé standard suffit. Pour des applications de forte puissance, les moteurs à courant alternatif sont généralement alimentés par une source de courants polyphasés. Le système le plus fréquemment utilisé est alors le triphasé (phases décalées de 120°) utilisé par les distributeurs d'électricité. Ces moteurs alternatifs se déclinent en deux types : les moteurs synchrones et les moteurs asynchrones. [27]

Les moteurs alternatifs asynchrones (rotor à cage) sont les plus couramment employés pour une gamme variée d'applications industrielles. Il est utilisé particulièrement pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts. [27]

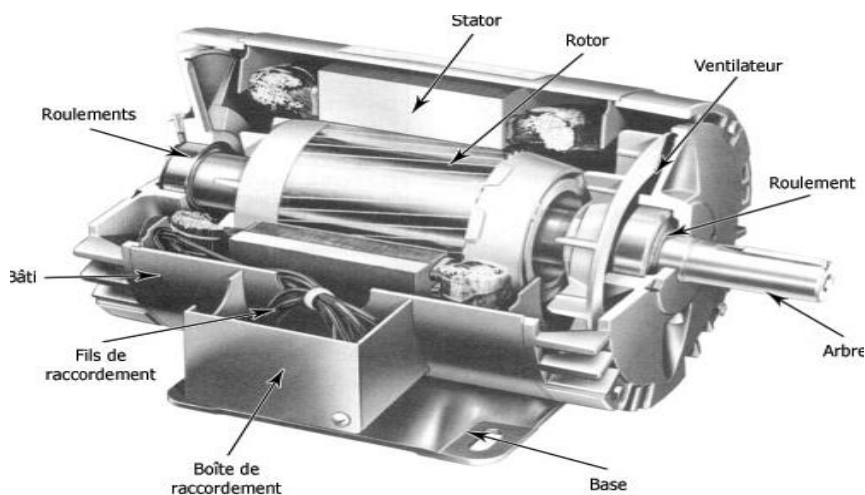


Figure II.11 Moteur synchrone [28].

L'arrivée d'onduleurs efficaces a permis l'utilisation de ce type de moteurs dans les applications de pompage solaire. [27]

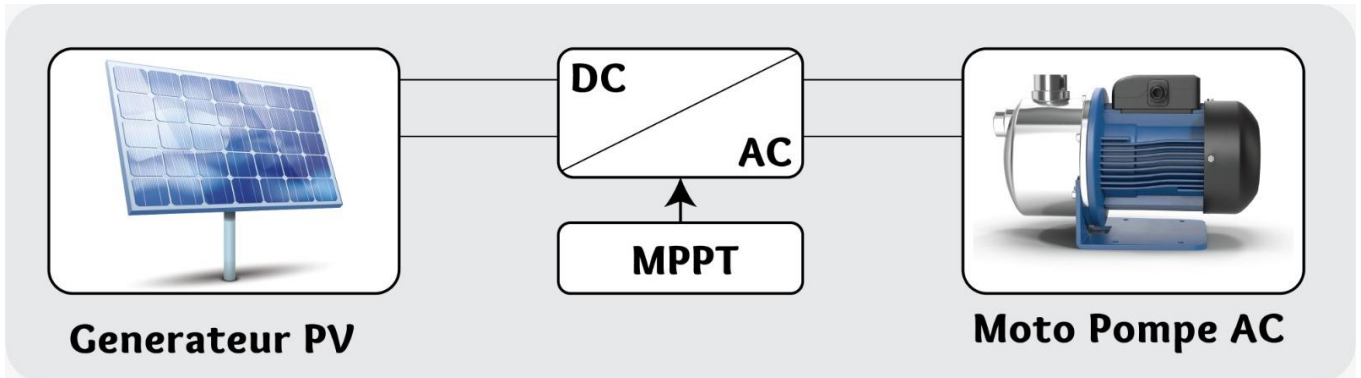


Figure II.12 Schéma synoptique simplifié du pompage PV par motopompe AC. [72]

II.7.2.3 Comparaison entre un moteur DC et AC

On peut comparer les moteurs à courant continu et alternatif en utilisant deux critères de base importants. Ce comparatif montrera les caractéristiques de chacun, ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Tableau II.2 Comparaison entre un moteur DC et AC [5-30].

	Moteur à courant continu	Moteur asynchrone
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Facilité de régulation. ▪ Rendement de 90%. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rendement de 90%. ▪ Nécessite peu d'entretien. ▪ Fiabilité.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coût d'entretien. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Difficulté et coût de régulation.

Il est mieux que les moteurs fonctionnant en courant continu doivent être sans balais ou d'autre pièce d'usure puisque cela garantit la moindre maintenance sur les moteurs. Le meilleur compromis pour actionner une pompe immergée est le moteur asynchrone. [30]

Les sources d'énergie disponibles aux sites d'extraction d'eau varient, ce qui implique que le moteur asynchrone peut fonctionner sous différents modes. Il peut fonctionner sur une source de tension alternative monophasée, biphasée ou triphasée. Si la source d'énergie est en courant continu, un onduleur est nécessaire pour la convertir en alternatif.

Selon le mode du fonctionnement de moteurs asynchrones, les caractéristiques seront différentes. Le tableau ci-dessous compare les caractéristiques d'un moteur monophasé et d'un moteur triphasé pour des dimensions (longueur–diamètre) identiques. [31]

Tableau II.3 Caractéristiques d'un moteur électrique monophasé et triphasé [31].

	Moteur monophasé	Moteur triphasé
Couple de démarrage [N.m]	0	10.33
Courant magnétisant [A]	1.398	0.931
Courant de démarrage [A]	9.87	17.98

Le couple de démarrage nul représente le principal inconvénient du moteur monophasé. Pour remédier à cet inconvénient, il est possible de faire fonctionner le moteur en diphasé lors de la phase de démarrage. L'enroulement principal reçoit la tension d'alimentation directement, l'enroulement auxiliaire est connecté au réseau d'alimentation par l'intermédiaire d'un condensateur [30].

II.8 Ressources en eaux du Sahara [24]

II.8.1 Les eaux superficielles

Les eaux superficielles au Sahara sont localisées dans les piedmonts de l'Atlas saharien et dans les régions du Hoggar et du Tassili. Les crues sont généralement rares et proviennent du grand Atlas marocain (Oued guir) et du versant sud des Aurès (Nememchas).

II.8.2 Les barrages

Les barrages sont critiques pour la région car ils servent de réserves d'eau et le contrôle de leur gestion est crucial pour garantir une distribution uniforme et programmée de la ressource.

Le Sahara se distingue par cinq (5) principaux réservoirs : Biskra (F. Gherza 47 hm³, F Gazelles 55 hm³) Bechar (D. Torba- 350 hm³) et Brézina : 122 hm³.

II.8.3 Les foggaras

La foggara est développée dans la région du Touat, Gourara et Tidikelt. Cette technique réalise à la fois le captage et l'adduction d'eau de la nappe aquifère au moyen d'un système de galeries drainantes. Le manque d'entretien a fait baisser le nombre de foggaras fonctionnelles de plus de 1300 à seulement.

II.8.4 Les eaux de sources

Les eaux de sources ne sont localisées qu'en bordure des piedmonts de l'Atlas Saharien. Parmi l'une des régions sahariennes, la plus favorisée par l'émergence de sources est celle des Zibans et ce, par sa nature géologique et sa position géomorphologique. En effet, la région de Biskra présente un nombre important de sources, dont leur débit avoisine les 120 l/s (Oumache et M'Lili). D'autres sources non moins importantes sont rencontrées en bordure du Tassili (Djanet).

II.8.5 Ressources en eau souterraines

Les ressources en eau souterraines au Sahara sont essentiellement constituées par :

- Les eaux renouvelables localisées dans les inféro-flux du versant sud des Aurès (région Nord de Biskra), du Hoggar- Tassili à l'Est et de la région de Bechar à Tindouf, à l'Ouest.
- Les eaux non renouvelables représentées par les deux grands réservoirs des deux bassins sédimentaires: le Complexe Terminal et le Continental Intercalaire.

II.9 Transfert des eaux des nappes profondes du Sahara [24]

Les principaux transferts des eaux des nappes profondes du Sahara sont:

- Transfert Sud-Nord des eaux du Sahara Septentrional vers les « Hauts Plateaux ».
- Transfert Sud-Sud: In Salah –Tamanrasset.



Figure II.13 Transfert des eaux des nappes profondes du Sahara [24].

II.10 Etude théorique de dimensionnement d'un système de pompage PV

Le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque comprend principalement le calcul de la puissance maximale du générateur photovoltaïque, la sélection de la pompe et du contrôleur adaptés aux besoins dans les conditions standard. L'approche analytique utilisée dans notre étude se compose de quatre étapes clés.

- Evaluation des besoins en eau.
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire.
- Détermination de l'énergie solaire disponible.
- Choix des composants.

II.10.1 Evaluation des besoins en eau

II.10.1.1 Détermination de la consommation spécifique

L'estimation des besoins en eau constitue la base du dimensionnement de système de pompage solaire photovoltaïque. Elle correspond au débit total nécessaire pour satisfaire les besoins de l'ensemble de la population et du cheptel. La détermination des besoins en eau pour la consommation d'une population donnée dépend essentiellement de son mode de vie. [34]

Tableau II.4 Consommation spécifique donnée par l'OMS [33].

Humain	
Survie	5 l/jour
Minimum admissible	10 l/jour
Condition de vie normale en Afrique	30 l/jour
Animaux	
Bœuf	40 l/jour
Mouton- Chèvre	5l/jour
Cheval	40 l/jour
Âne	20 l/jour (réserve de 8 jours)
Irrigation	
Riz	100 m ³ /jour/ha
Graines	45 m ³ /jour/ha
Canne à sucre	65 m ³ /jour/ha
Coton	55 m ³ /jour/ha

II.10.2 Calcul de l'énergie hydraulique quotidienne requise

Une fois les besoins nécessaires en volume d'eau pour chaque mois de l'année et les caractéristiques du puits sont définis, nous pouvons calculer l'énergie hydraulique moyenne journalière et mensuelle nécessaire à partir de la relation [35] :

$$E_h = C_h \times Q \times HMT \quad (\text{II-1})$$

Avec :

- E_h : Énergie hydraulique [kWh/j].
- C_h : Constante hydraulique [kg.s.h/m^2].
- Q : Volume d'eau.
- HMT : Hauteur manométrique total.

Où :

- $C_h = g \cdot \rho / 3600 = 2,725$ [kg.s.h/m^2].
- g : La gravité terrestre [9.81m/s^2].
- ρ : densité de l'eau [1000kg/m^3].

II.10.2.1 Calcul de la hauteur manométrique totale (HMT)

Pendant le processus de pompage, le niveau d'eau dans le puits a tendance à baisser et l'eau ne peut plus être pompée jusqu'à ce que le taux de régénération dans le puits atteigne le bilan hydrique. La réduction du niveau d'eau dans le puits dépend de plusieurs facteurs tels que le type et la perméabilité du sol et l'épaisseur de l'aquifère [36]. La **HMT** (Hauteur Manométrique Totale) d'une pompe est calculée en mesurant la différence de pression, en mètres de colonne d'eau, entre les entrées et les sorties d'eau.

$$HMT = H_g + P_c \quad (\text{II-2})$$

Avec :

- **H_g (Hauteur Géométrique)** : est la distance en mètres entre la nappe d'eau soulevée (niveau dynamique) et le niveau d'utilisation. Elle peut être calculée à l'aide de la formule suivante (voir figure II.14) :

$$H_g = S_0 + N_s + H_r \quad (\text{II-3})$$

Où :

- S_0 : Rabattement (m).
- H_r : hauteur du réservoir (m).
- P_c : Les pertes de charge causées par la friction entre l'eau et les parois des conduites varient en fonction de la distance entre les conduites, leur diamètre et le débit de la pompe, et sont mesurées en mètres d'eau.

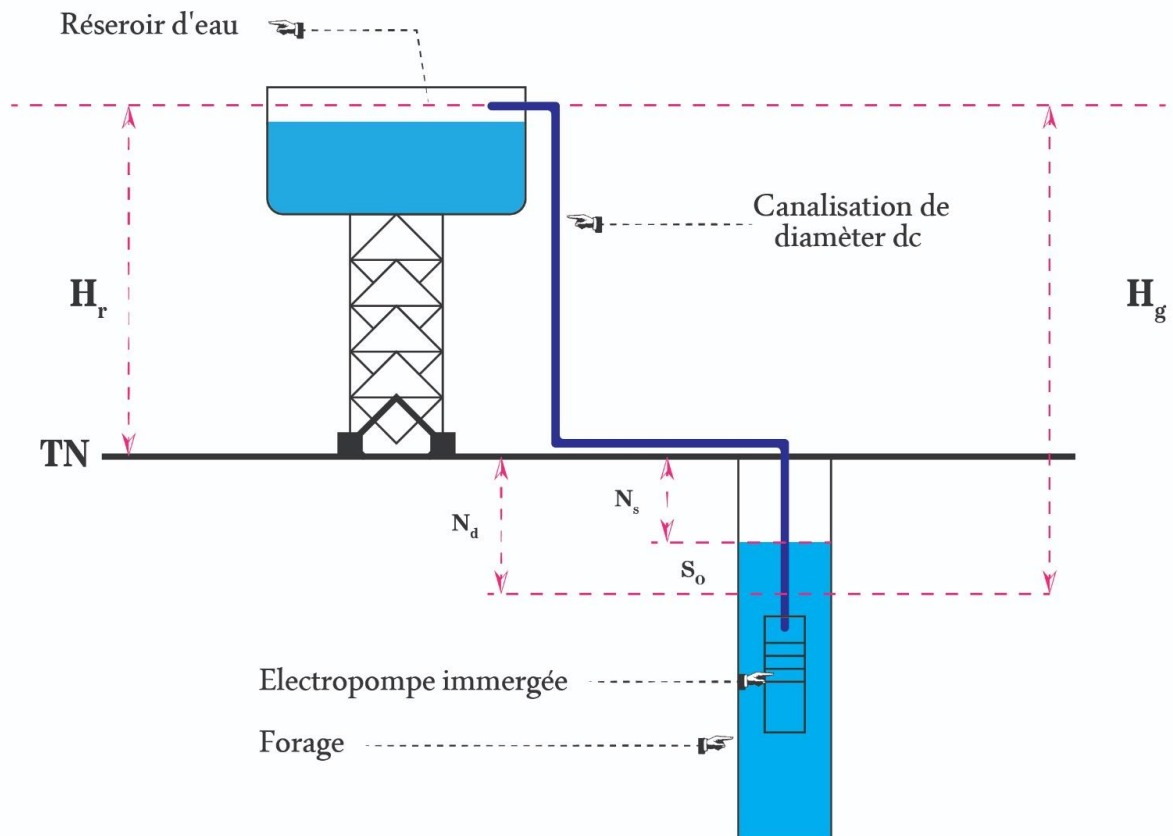


Figure II.14 Hauteur manométrique total. [72]

- N_s : est la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au point le plus élevé auquel on doit pomper l'eau.
- N_d : représente les pertes d'eau dans la tuyauterie.

La formule de DarcyWeisbach permet le calcul de la hauteur dynamique : [36]

$$N_d = f \cdot \left(\frac{L.V^2}{D^2.g} \right) \quad (\text{II-4})$$

Avec :

- **f** : coefficient de friction des parois de la tuyauterie.
- **L** : longueur de la tuyauterie (m).
- **v** : vitesse moyenne du fluide (m/s).
- **D** : diamètre de la tuyauterie (m).
- **g** : accélération de la pesanteur (m/s²).

Si le système de tuyauterie comporte des accessoires tels que des vannes, des coudes, des téés, des jonctions, etc., il est possible de calculer les pertes de charge pour chaque élément supplémentaire en utilisant la méthode suivante :

$$N_d = K_{ac} \frac{v^2}{2g} \quad (\text{II-8})$$

Où :

- **K_{ac}** : est un coefficient dépendant du type d'accessoire.

Le tableau II.5 présente une liste de valeurs de K_{ac} correspondant à différents accessoires.

Tableau II.5 liste de valeurs de K_{ac} [36].

Accessoire	Coefficient K _{ac}
Jonction du réservoir à tuyauterie connexion au ras de la paroi	0,5
Jonction de tuyauterie au réservoir	1,0
Coude 45°	0,35 à 0,45
Coude 90°	0,50 à 0,75
Tés	1,50 à 2,00
Vannes de contrôle (ouverte)	3,0

De manière générale, il est conseillé que la hauteur dynamique ne dépasse pas 10 % de la hauteur totale de refoulement de la pompe.

La différence entre le niveau dynamique et le niveau statique est appelée rabattement S_0 . Ce rabattement sera calculé par la formule de Jules Dupuit [38] :

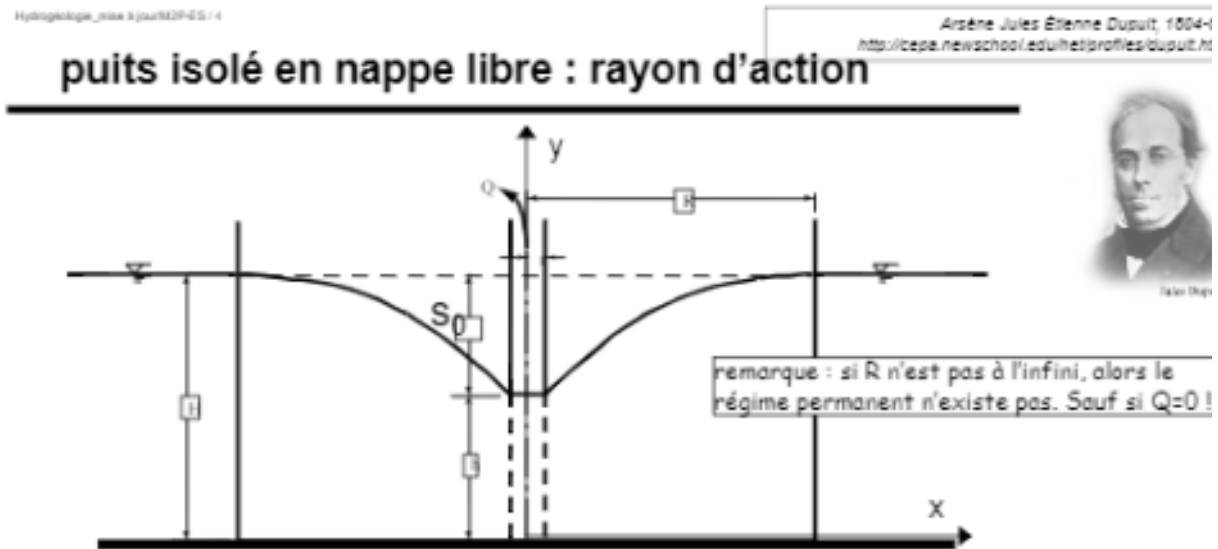


Figure II.15 Formule de Jules Dupuit [38].

La formule de Jules Dupuit :

$$Q = \frac{\pi \cdot k (H^2 - h^2)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad (\text{II-9})$$

La formule empirique de Sichardt :

$$R = 30(H - h) \cdot \sqrt{K} \quad (\text{II-10})$$

Où :

- **H** : Epaisseur de la partie saturée en (m).
- **Q** : Débit de pompage en (m³/s).
- **K** : Perméabilité du sol en m/s.
- **r** : Rayon du forage.
- **R** : Rayon d'action ou d'influence du cône de dépression en (m).
- **h** : Hauteur d'eau dans le forage pendant le pompage en (m).

Après avoir déterminé le HMT et la capacité de pompage, nous nous référons au catalogue du fabricant de la pompe pour sélectionner une pompe qui répond aux exigences. [39]

II.10.3 Calcul de l'énergie électrique nécessaire par jour E_{elec}

La formule suivante permet de calculer la quantité d'énergie électrique nécessaire (en kilowattheures par jour) pour soulever une quantité donnée d'eau sur une hauteur spécifiée pendant une journée [44-45] :

$$E_{elec} = \frac{C_h \times Q \times HMT}{\eta G} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

- C_h : Constante hydraulique [kg.s.h/m²].
- Q : Volume d'eau.
- HMT : Hauteur manométrique total.
- ηG (**Rendement du groupe de pompage**) = [$\eta_{moteur} \times \eta_{pompe}$] :
 - ♦ Rendement moteur de 75% à 85% on prendra 80%.
 - ♦ Rendement pompe de 45% à 65% on prendra 55%.

Donc :

- $\eta G = 0,6 \%$.

II.10.4 Énergie solaire disponible et dimensionnement du pompage PV

II.10.4.1 Estimation de l'ensoleillement

Dans le chapitre précédent, plusieurs sites officiels de cartographie d'ensoleillement de la région d'ELOUED ont été examinés en détail pour notre système. Nous avons obtenu une moyenne d'ensoleillement de **5 KW /m²/j**.

II.10.4.2 Dimensionnement du champ photovoltaïque

La chaîne de conversion d'un système de pompe solaire photovoltaïque est conçue pour convertir l'énergie solaire en énergie électrique utilisable pour faire fonctionner la pompe. Cette chaîne se compose de différents éléments qui travaillent ensemble pour assurer un fonctionnement efficace et stable du système.

II.10.4.2.1 Calcul de la puissance crête P_{cr}

L'énergie fournie par les panneaux solaires pour une journée doit être égale à l'énergie consommée par la pompe par jour. [45]

La puissance crête se calcule en fonction de trois facteurs :

- L'énergie électrique calculée selon les besoin de notre système E_{elec} .
- Le facteur de correction $F_c = 0.6$ jusqu'à 0.8 on prendra 0.6 .
- L'ensoleillement moyen du site d'installation E_{ns} .

$$P_{cr} = \frac{E_{elec}}{E_{ns} \cdot F_c} \quad (\text{II. 12})$$

II.10.4.2.2 Détermination de tension du système

La tension de système se détermine par un tableau des intervalles comme suit :

Tableau II.6 Tension de système photovoltaïque selon la puissance crête. [62]

Puissance de champ	0-500 w	500w- 2Kw	2Kw - 10 Kw	plus de 10Kw
Tension de système	12V	24V	48V	96V

II.10.4.2.3 Le nombre de modules photovoltaïques

1) Le nombre de modules connectés en série sera :

$$N_{ps} = \frac{V_{m.ond}}{V_{mpp}} \quad (\text{II. 14})$$

Où :

- $V_{m.ond}$: la tension moyenne absorbe par l'onduleur.
- V_{mpp} : La tension de module.

2) Le nombre de branches (modules en parallèle) :

$$N_{pp} = \frac{I_{ond}}{I_{mpp}} \quad (\text{II. 15})$$

Où :

- I_{ond} : Le courant absorbé par l'onduleur.
- I_{mpp} : Le courant de module.

II.10.4.2.4 Critères de Choix de type de pompe

- a) Le choix du type de pompe dépend de plusieurs facteurs, notamment de la profondeur de la source d'eau.

Tableau II.7 Choix de type de pompe. [62]

Le niveau dynamique	$N_d < 6$ m (puits)	N_d de 10 m à 100 m	$N_d > 100$ m
La pompe	pompe de surface	pompe immergée centrifuge	pompe immergée volumétrique

- b) Le choix des moteurs [46]:

Les pompes de petite puissance, qui ont une faible hauteur manométrique totale et un débit journalier limité, sont équipées de moteurs en courant continu sans balais et de faible tension, généralement de 12V ou de 24V.

Les pompes de moyenne puissance, qui ont une hauteur manométrique totale comprise entre 10 et 60 mètres et un débit journalier moyen, sont équipées de moteurs en monophasé ou triphasé. Pour fonctionner, ces pompes nécessitent un convertisseur continu/alternatif (onduleur), qui peut être installé à l'extérieur ou à l'intérieur de la pompe.

Avant de choisir une pompe, il est essentiel de consulter les courbes fournies par les fabricants afin de s'assurer que la pompe est capable de fournir le débit requis pour la hauteur manométrique totale (HMT) souhaitée.

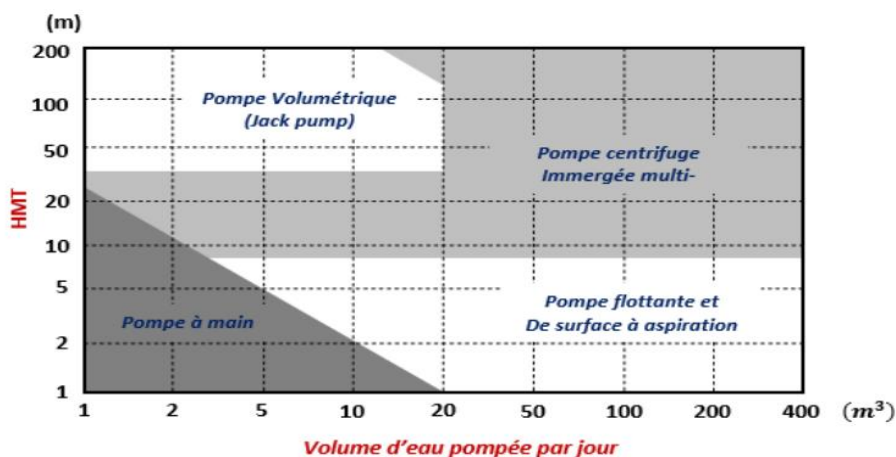


Figure II.16 Critère de choix de pompe selon besoin journalier et HMT [46].

II.10.4.2.5 Choix de l'onduleur

Le choix d'un onduleur pour le pompage dépend de plusieurs critères. Tout d'abord, la puissance de l'onduleur doit être adaptée à la puissance du moteur de la pompe. Il est également important de considérer le type de moteur, qu'il s'agisse d'un moteur en courant continu ou en courant alternatif, ainsi que sa tension nominale. [63]

Ensuite, la plage de fréquence de sortie de l'onduleur doit correspondre à celle requise par la pompe. La capacité de l'onduleur à fonctionner avec des panneaux solaires ou des batteries doit également être prise en compte si la pompe est alimentée par une source d'énergie renouvelable. [63]

Enfin, le choix de l'onduleur doit être fait en fonction des conditions environnementales dans lesquelles il sera utilisé, notamment la température et l'humidité. [63]

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé deux techniques de pompage photovoltaïque : le pompage sans batterie et le pompage avec batterie. Nous avons détaillé le système photovoltaïque en présentant ses composants ainsi que son principe de fonctionnement, incluant le choix des moteurs et des pompes. Nous avons également discuté des avantages et des inconvénients de ces systèmes, en plus d'étudier les dimensions importantes nécessaires à la compréhension de l'étude pratique présentée dans le chapitre suivant.



CHAPITRE III

Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque

Nombre Des Pages : 17

III.1 Introduction

Le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque implique la détermination de la quantité d'énergie solaire nécessaire pour faire fonctionner la pompe, la sélection de la pompe appropriée pour répondre aux besoins de débit et de pression, et le dimensionnement du système de stockage de l'énergie pour une utilisation efficace de l'énergie solaire.

Dans ce chapitre, nous appliquerons un algorithme de volume au système de pompage photovoltaïque, pour répondre aux besoins locaux. Dans la région d'EL OUED.

III.2 Situation géographique d'El Oued

La wilaya d'El-Oued, aussi appelée Souf, s'étend sur une superficie de 44.586,80 km². Elle est limitée [65]:

- Au nord, par la wilaya de Khanchla.
- Au sud-ouest, par la wilaya d'Ouargla.
- A l'ouest, par la wilaya de Djelfa.
- A l'est, par la Tunisie.
- Au nord-est, par la wilaya de Tébessa.
- Au nord-ouest, par la wilaya de Biskra.

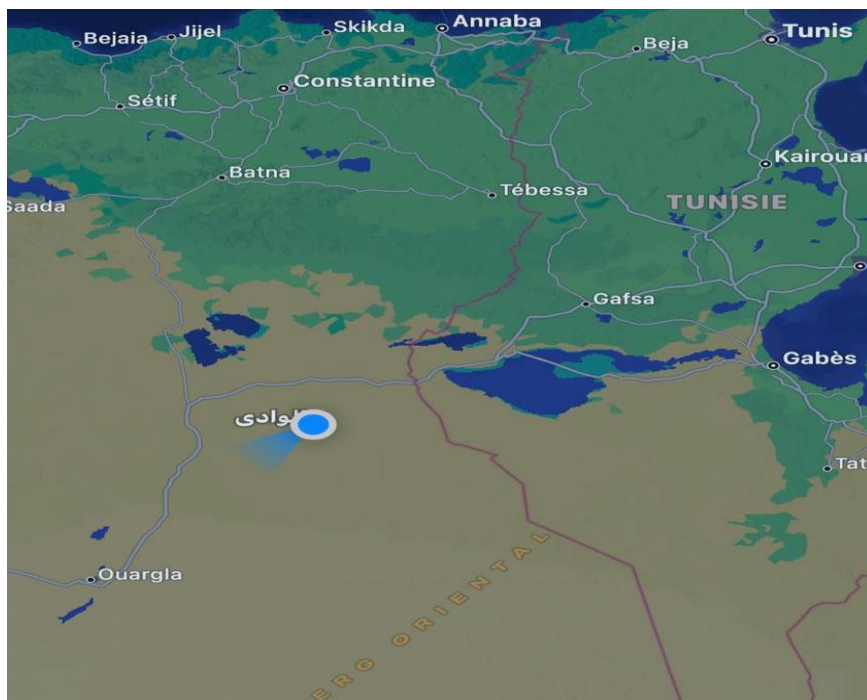


Figure III.1 Localisation d'EL OUED. [64]

III.2.1 Coordonnées géographiques de Reguiba (Région ELKARMA) [62]

- Altitude de Reguiba : 55 m.
- Latitude: 33.5642.
- Longitude: 6.7123.
- 33° 33' 51" Nord.
- 6° 42' 44" Est.



Figure III.2 Arrosage pastoral d'El-oued. [62]

III.3 Milieu physique

III.3.1 Climatologie

La région d'ELOUED est caractérisée par un climat de type saharien avec des températures élevées, une faible pluviométrie et une forte évaporation.

III.3.2 Température moyenne

La saison très chaude dure 3,2 mois, du 6 juin au 13 septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale supérieure à 35 °C. Le mois le plus chaud de l'année à Oued Souf est juillet, avec une température moyenne maximale de 40 °C et minimale de 27 °C. [66]

La saison fraîche dure 3,5 mois, du 20 novembre au 6 mars, avec une température quotidienne moyenne maximale inférieure à 21 °C. Le mois le plus froid de l'année à Oued Souf est janvier, avec une température moyenne minimale de 6 °C et maximale de 17 °C. [66]

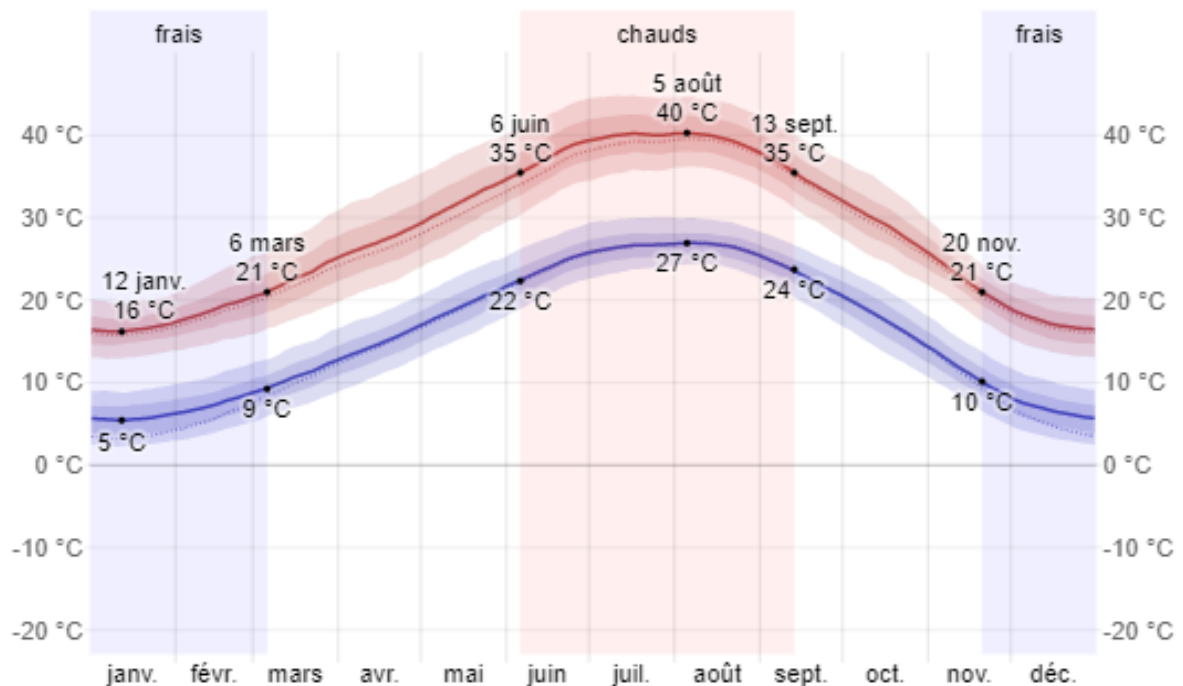


Figure III.3 Température moyenne maximale et minimale à Oued Souf. [66]

III.3.3 Pluviométrie

Pour montrer la variation au cours des mois et pas seulement les totaux mensuels, nous montrons l'accumulation de pluie au cours d'une période glissante de 31 jours centrée sur chaque jour de l'année. Oued Souf connaît des variations saisonnières modérées en ce qui concerne les précipitations de pluie mensuelles. [67]

Chutes de pluie au cours de l'année à Oued Souf. Le mois le plus pluvieux à Oued Souf est janvier, avec une chute de pluie moyenne de 9 millimètres. [66]

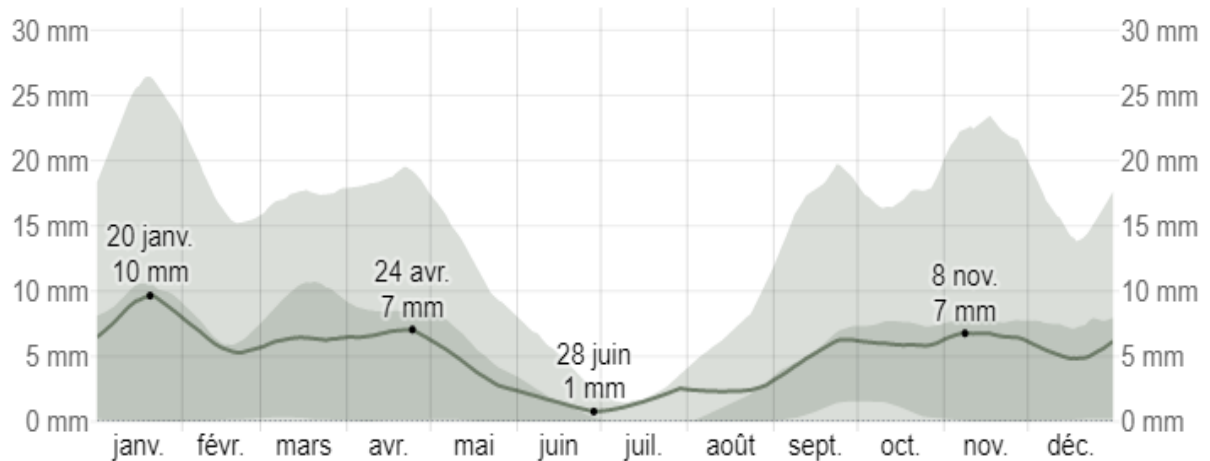


Figure III.4 Pluviométrie mensuelle moyenne à Oued Souf. [66]

III.3.4 Soleil

La longueur du jour à Oued Souf varie considérablement au cours de l'année. En 2023, le jour le plus court est le 22 décembre, avec 9 heures et 57 minutes de jour ; le jour le plus long est le 21 juin, avec 14 heures et 22 minutes de jour. [67]

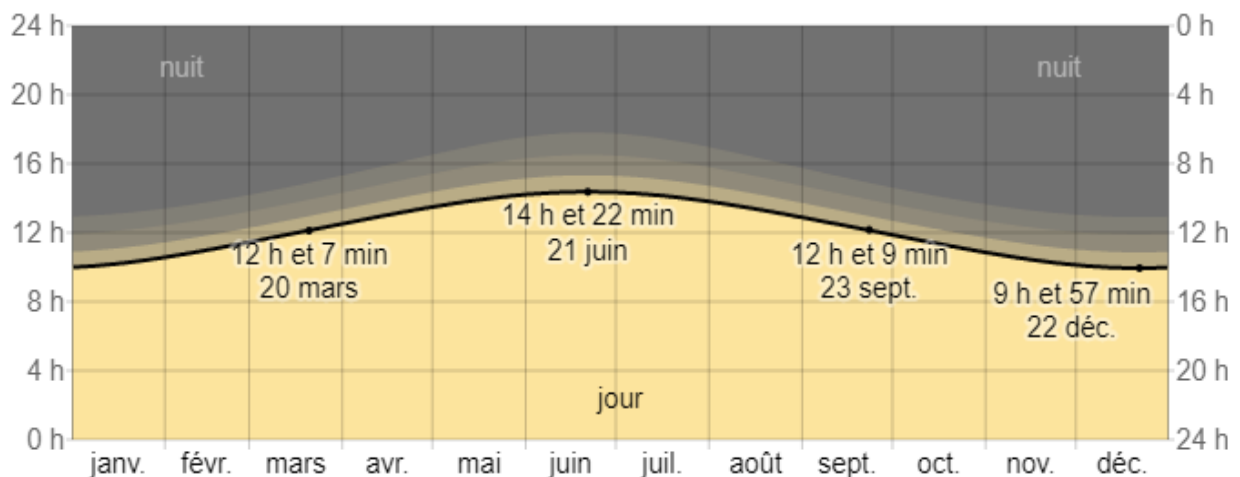


Figure III.5 Heures de clarté et crépuscule à Oued Souf. [66]

III.3.5 Rayonnement solaire

Cette section traite du rayonnement solaire incident en ondes courtes quotidien total atteignant la surface du sol sur une zone étendue, en tenant pleinement compte des variations saisonnières sur la longueur du jour, de la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon, de l'absorption par les nuages et d'autres composantes atmosphériques. Le rayonnement en ondes courtes inclut la lumière visible et le rayonnement ultraviolet. Le rayonnement solaire incident en ondes courtes quotidien moyen connaît une variation saisonnière considérable au cours de l'année. [66]

La période la plus lumineuse de l'année dure 4,1 mois, du 18 avril au 23 août, avec un rayonnement solaire incident en ondes courtes par mètre carré supérieur à 6,9 kWh. Le mois de l'année le plus lumineux à Oued Souf est juin, avec une moyenne de 7,8 kWh. [66]

La période la plus sombre de l'année dure 3,1 mois, du 31 octobre au 4 février, avec un rayonnement solaire incident en ondes courtes par mètre carré inférieur à 4,1 kWh. Le mois de l'année le plus sombre à Oued Souf est décembre, avec une moyenne de 3,2 kWh. [66]

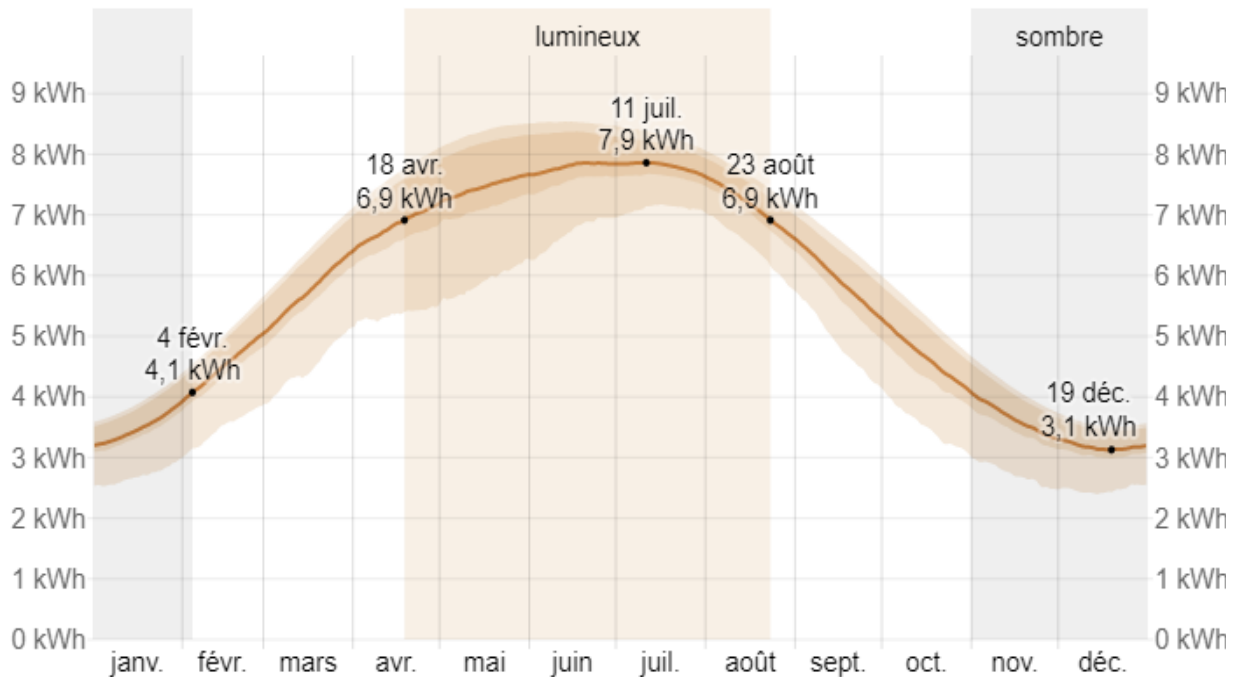


Figure III.6 Rayonnement solaire incident en ondes courtes quotidien moyen el oued. [66]

III.4 Dimensionnement complet de l'installation PV

Nous allons procéder au dimensionnement tout en suivant les étapes suivantes :

III.4.1 Détermination du besoin en eau

La détermination du besoin en eau dépend de nombreux facteurs tels que le climat, la température, la végétation, l'humidité du sol, l'activité humaine, etc :

Besoin en eau = 32 m³ (bassin 4x4 m haute de 2m) Répondre aux besoins de 797 chameaux et 1688 moutons et 30 cheval.

III.4.2 La hauteur manométrique totale (HMT)

La hauteur totale du manomètre d'une pompe (HMT), qui correspond à la différence de pression en mètres de colonne d'eau (mCE) entre les orifices d'aspiration et de refoulement, peut être calculée de la manière suivante :

- $HMT = H_g + P_c$
- $H_g = S_0 + N_d + H_r$
- $N_d = 40 \text{ m}$
- $H_r = 02 \text{ m}$
- $P_c = 10 \% \text{ de } 42 = 4,2 \text{ m}$
- $HMT = H_r + N_d + P_c \text{ (en m)}$
- $HMT = 2+40+4,2 = 46,2 \text{ m}$

C'est la HMT totale du système = 46.2 m

Où (N_d) le niveau dynamique, (H_r) la hauteur du réservoir, (P_c) les pertes de charge et (H_g) la hauteur géométrique et (S_0) le Rabattement. Ces pertes de charge sont estimées à 10 % de la hauteur géométrique.

Nous avons :

- Estimation de l'ensoleillement = **5 KW /m²/j.**
- Le facteur de correction $F_c = 0.6 \text{ à } 0.8$ on prendra **0,6.**
- L'ensoleillement moyen de site d'installation $E_{ns} = 5.$
- Longueur de câble = **45 m.**

III.4.3 Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire

Après avoir déterminé les paramètres du puits et les besoins en eau nécessaires, nous avons utilisé la relation illustrée ci-dessous pour calculer l'énergie hydraulique quotidienne E_h (en Wh/j) nécessaire :

$$E_h = C_h \times Q \times HMT$$

$$E_h = \frac{\rho \times g \times HMT \times Q}{3600} = \frac{1000 \times 9.81 \times 32 \times 46.2}{3600} = 4.02864 \text{ KW}$$

Où :

- $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$: C'est la constante de la pesanteur ;
- $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$: C'est la masse volumique de l'eau.

III.4.4 Calcul de l'énergie électrique

L'équation suivante est utilisée pour déterminer la quantité d'énergie électrique nécessaire à E_{elec} , exprimée en (kWh/j) :

$$E_{elec} = \frac{C_h \times Q \times HMT}{\eta G}$$

Où ηG représente le rendement du groupe motopompe qui est et de l'ordre de 60%. Alors :

$$E_{elec} = \frac{2.725 \times 32 \times 46.2}{0.6} = \frac{7553.7}{0.6} = 6.7144 \text{ KWh}$$

III.4.5 Calcul de la puissance crête

Le rayonnement de l'emplacement affecte la puissance de crête du générateur solaire. L'équation suivante est utilisée pour le calculer :

$$P_{cr} = \frac{E_{elec}}{E_{ns} \cdot F_c} = \frac{6.7144}{5 \times 0.6} = 2.5 \text{ KWc}$$

III.4.6 Détermination de tension du système

La tension de système se détermine par un tableau des intervalles comme suit :

Tableau III.1 Tension de système photovoltaïque selon la puissance crête.

Puissance de champ	0-500W	500W- 2KW	2Kw - 10 KW	Plus de 10KW
Tension de système	12V	24V	48V	96V

- Alors la tension du système est **48 V**

III.4.7 Détermination du nombre de modules photovoltaïques

Pour notre installation, nous choisissons le type de panneau solaire suivant :

- (1649 × 992×35) mm.
- $P_{mpp} = 270 \text{ W}$.
- $V_{mpp} = 32,70 \text{ V}$.
- $I_{cc} = 8,81 \text{ A}$.
- $I_{mpp} = 8,35 \text{ A}$.

Ces panneaux sont assortis d'un onduleur triphasé présentant les caractéristiques suivantes :

- $P = 2500 \text{ W}$.
- $V = 220 \text{ V}$.
- $V_{\max} = 350$.
- $I = 10 \text{ A}$.

Soit la tension moyenne absorbée par l'onduleur est :

- $V_{m.ond} = \frac{V_{\max} + V}{2} = \frac{350+220}{2} = 285 \text{ V}$.



Figure III.7 Onduleur SOLAR PUMP CONTROLLER 220V. [70]

Pour installer ces panneaux, il est essentiel de déterminer le nombre de panneaux dans chaque série (N_{ps}) et le nombre de chaînes en parallèle (N_{pp}). Chaque chaîne est constituée de panneaux connectés en série.

Le nombre de panneaux en série est obtenu en divisant la tension moyenne absorbée par l'onduleur par la tension d'un module photovoltaïque :

$$N_{ps} = \frac{V_{m.ond}}{V_{mpp}} = \frac{285}{32.70} = 8.71 \approx 09 \text{ panneaux en série.}$$

Diviser le nombre total de panneaux par le nombre total de panneaux en série pour obtenir le nombre de chaînes parallèles :

$$N_{pp} = \frac{I_{ond}}{I_{mpp}} = \frac{10}{8.35} = 1.19 \approx 02 \text{ panneaux en série.}$$

Donc le nombre de panneaux dans notre système est 09 panneaux en série multiple a 02 panneaux en parallèle = 18 Panneaux

III.4.8 Choix de type de pompe

Pour déterminer le type de pompe qui correspond à notre étude, nous avons d'abord utilisé le tableau présenté dans la figure suivante :

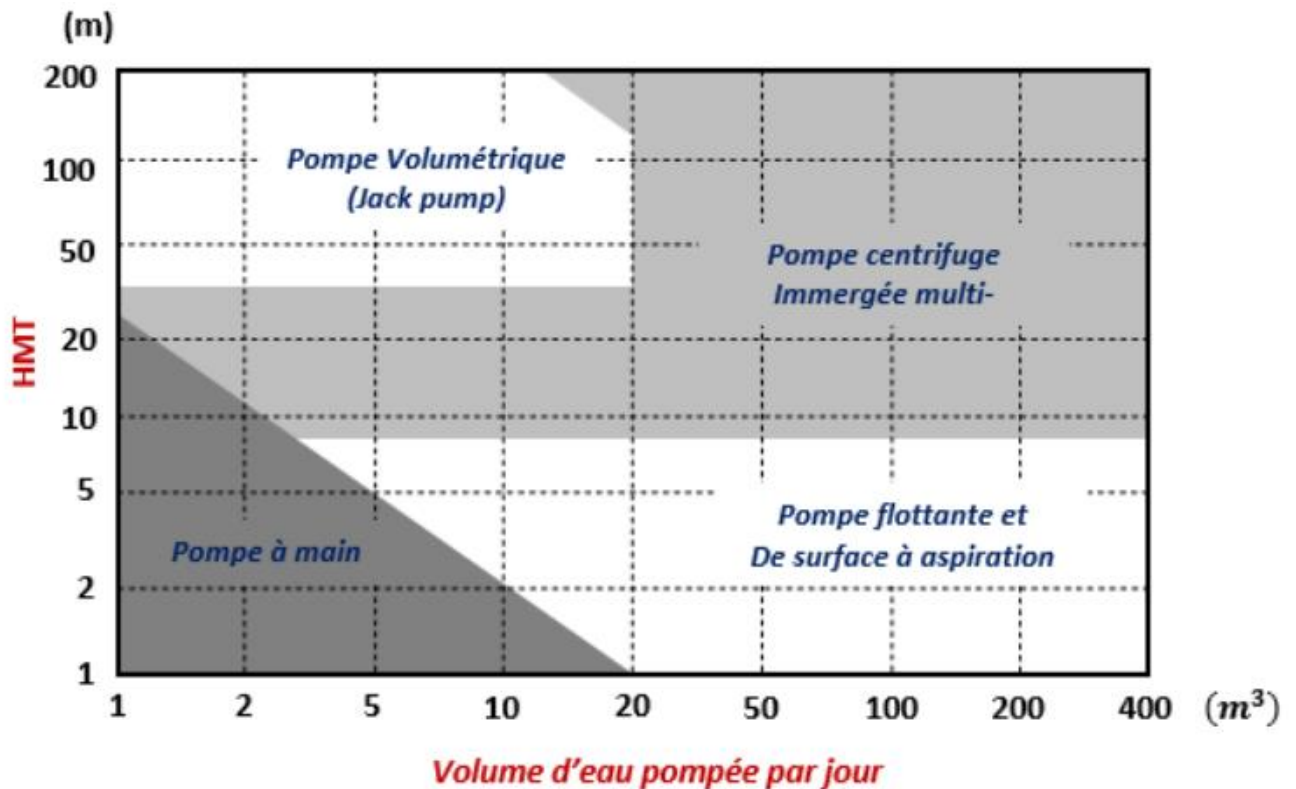


Figure III.8 Critère de choix de pompe selon besoin journalier et HMT [46].

Nous avons un besoin en eau de 32 m³ et la hauteur manométrique totale est 10 m à 100 m. Nous concluons donc le type de pompe et **pompe immergée centrifuge**.

III.4.9 Choix des câbles

Les intensités les plus élevées se trouvent dans la partie courant continu de l'installation, ce qui pose un problème de pertes par effet Joule et de chutes de tension dans les câbles. Par

conséquent, il est nécessaire de déterminer les sections de câbles qui entraînent le moins de chutes de tension possibles entre les panneaux solaires et l'onduleur-chargeur, ainsi qu'entre les batteries et l'onduleur-chargeur. [71]

Formule de calcul de la section du câble :

$$S = 2 \times \frac{\rho \times L \times I}{\varepsilon \times V}$$

Selon la norme, la chute de tension maximale entre panneaux → régulateur → onduleur et batterie = $\Delta U=3\%$

Avec :

- S : section du câble (mm²).
- ρ : résistivité du matériau conducteur (cuivre ou aluminium) en service normal. ($\rho=0.02314 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)
- L : longueur du câble (m).
- I : courant circulant dans le câble (A).
- ε : chute de tension ($\varepsilon=0.03$).
- V : tension à l'origine du câble.

III.4.9.1 Détermination de la section des conducteurs entre les panneaux et l'onduleur

Nous avons :

- V = 32.7 V
- I = 8.35 A
- L = 20 m

A. N :

$$S = 2 \times \frac{0.02314 \times 20 \times 8.35}{0.03 \times 32.70} = 7.87 \text{ mm}^2$$

III.4.9.2 Détermination de la section des conducteurs entre l'onduleur et la pompe

Nous avons :

- V = 32.7 V
- I = 10 A
- L = 55 m

A. N :

$$S = 2 \times \frac{0.02314 \times 220 \times 10}{0.03 \times 32.70} = 25.94 \text{ mm}^2$$

III.4.10 Conception du support des panneaux

Tout d'abord, nous avons élaboré une conception du support capable de supporter le poids des panneaux solaires ainsi que les effets des agents atmosphériques tels que le vent et la pluie (Figure III.9). Ce support est fabriqué en cornière métallique implantée au sol. Il présente une inclinaison de 45° par rapport à l'horizontale, ce qui garantit un bon compromis entre une production d'énergie optimale et un bon nettoyage des modules par la pluie. Le choix du matériau est justifié par les conditions suivantes : [71]

- Bonne résistance mécanique.
- Une bonne tenue à la corrosion.
- Une faible conductivité thermique.
- Un poids légers, ...etc.

En tenant compte de ces conditions, on a effectué la conception de ce support (figure III 9), et ce en utilisant des cornières métalliques.

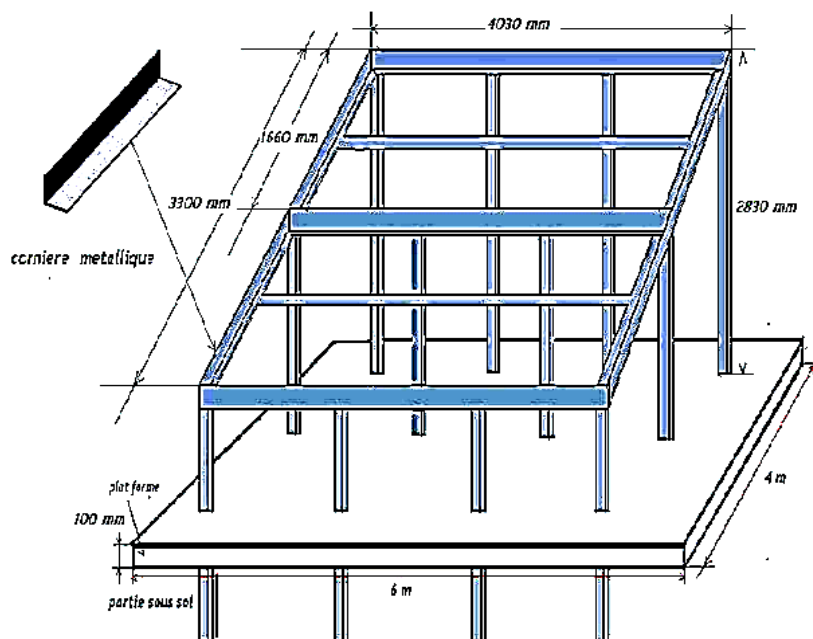


Figure III.9 Schéma d'un support métallique des panneaux solaires avec une inclinaison de 45°

[46].

III.5 Etude technico-économique

Nous avons tous tendance à valoriser la valeur approximative de ce pompeux système photovoltaïque afin d'obtenir une idée générale des associations dépendantes de ces systèmes dans notre pays, en raison des avantages et des inconvénients qu'ils présentent.

Tableau III.2 Devis Estimatif D'un Système De Pompage PV.

N°	Désignation	P.U (DA)	Q	Montant (DA)
1	Onduleur + régulateur	27.000,00	1	27.000,00
2	Panneaux	13.000,00	18	234.000,00
3	Cables et accessoires	60.000.00	1	60.000.00
4	Pompe immergée	80.000.00	1	80.000.00
5	Installation + GCv	75.000,00	1	75.000,00
Total				476000.00

▪ **En cas de suspension de l'état :**

La suspension de l'état = 45% alors le cout devient :

$$476000 \times \frac{45}{100} = 214.200,00 \text{ DA}$$

Alors le cout devient : 261.800,00 DA

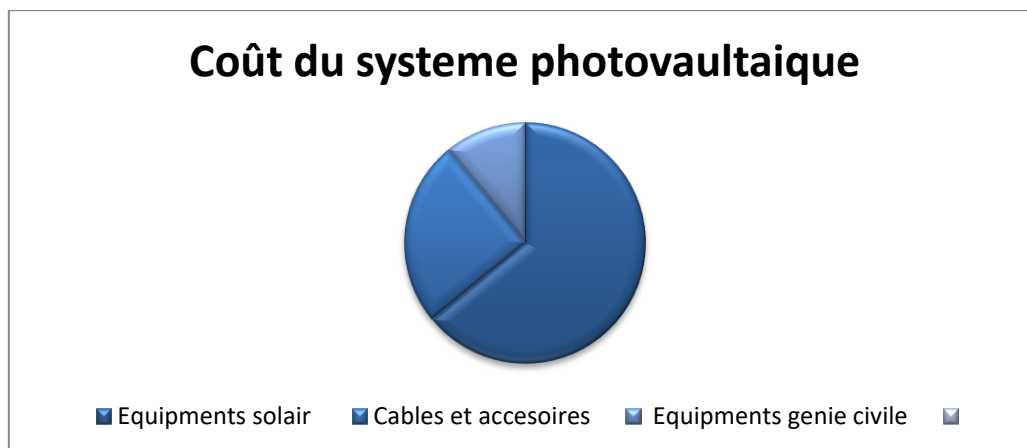


Figure III.10 Distribution des coûts du système de pompage photovoltaïque.

Il est évident que le système présente un coût global relativement élevé, mais sa rentabilité à long terme offre une perspective différente. Il convient de rappeler que le gouvernement algérien déploie d'importants efforts pour encourager l'agriculture, en particulier dans le sud du pays. Plusieurs aides et subventions sont fournies aux agriculteurs. Ces derniers insistent fortement pour que le pompage photovoltaïque bénéficie d'une subvention de 45%. Cette demande est actuellement en cours de négociation, mais elle représente une avancée positive dans ce domaine.

Afin de démontrer la rentabilité, nous procédons au calcul du prix du kilowatt-heure (KWh) produit par le système photovoltaïque et le comparons au coût d'utilisation de l'électricité conventionnelle fournie par Sonelgaz. Nous examinerons également l'amortissement du système, à la fois avec et sans l'aide de l'État.

Le tableau suivant présente la durée de vie des différents composants d'un système photovoltaïque de pompage : [75]

Tableau III.3 Durée de vie des composants d'un système de pompage photovoltaïque.

Composant	Durée de vie
Module photovoltaïque	25
Fixation du module	25
Pompe	15
Onduleur	25
Régulateur (Au besoin)	12
Batteries (Au besoin)	08

III.5.1 L'amortissement du système PV

1) Sans aide de l'état :

Les calculs ont donné les résultats suivants :

- Prix du KWh : 7,83 Da.
- Prix du KWh de Sonelgaz : 5 Da.
- Cout annuel : 80 248,90 Da.

Amortissement du système : illustré par l'histogramme suivant :

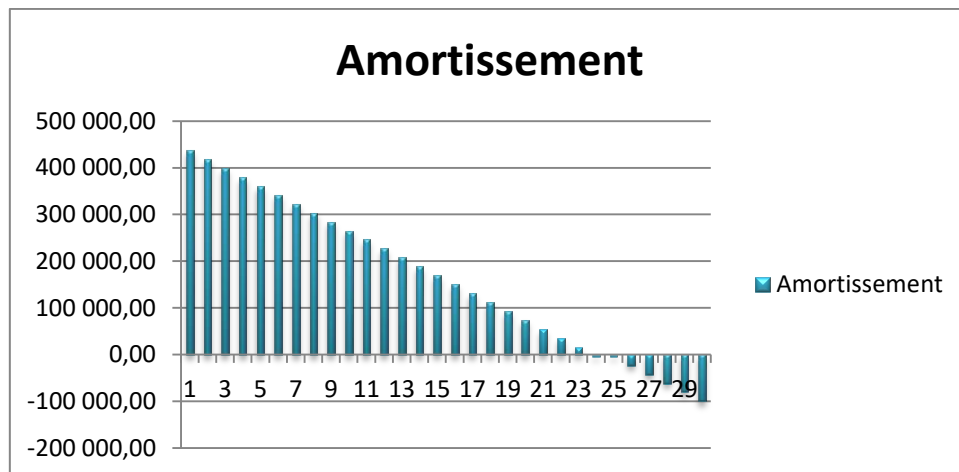


Figure III.11 Histogramme d'amortissement du système de pompage (Sans aide de l'état).

On remarque que l'amortissement du système est atteint au bout de 23 ans. C'est vrai que c'est un peu long, mais il ne faut pas oublier que pendant cette période, on ne paie aucune somme à Sonelgaz. De plus, au-delà de cette période, l'énergie sera gratuite.

Pour compléter la comparaison, les prix du kilowatt-heure (KWh) ne diffèrent pas beaucoup. Il convient de signaler qu'ici, nous n'avons pas pris en compte les frais de raccordement au réseau électrique, sinon le prix du KWh fourni par Sonelgaz serait du même ordre.

2) Avec aide de l'état :

Ces résultats sont calculés pour une aide de l'état de 45 % :

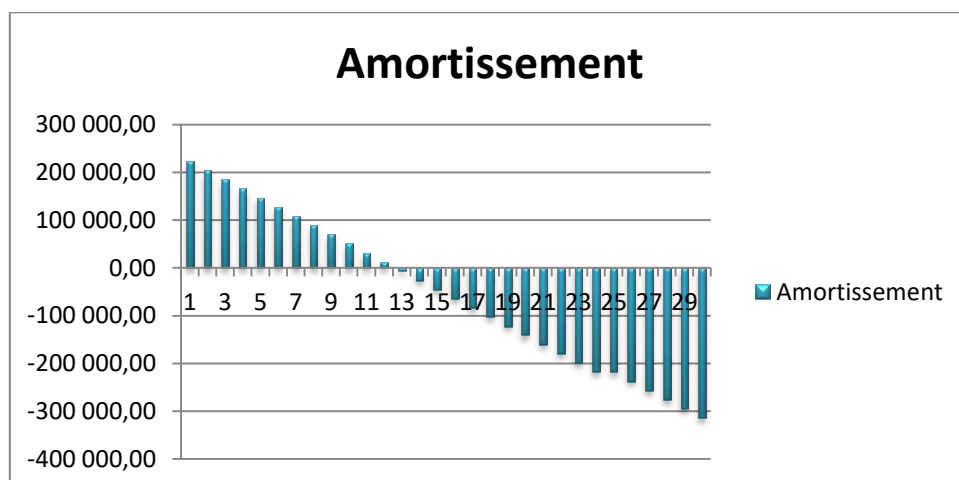


Figure III.12 Histogramme d'amortissement du système de pompage (avec aide de l'état).

Il est clair que l'aide de l'état apportera un plus au système. On remarque sur l'histogramme qu'au bout de 12 ans uniquement, le système est totalement amorti. Ce résultat est très prometteur, car la rentabilité commencera à partir de la 13^{ème} année.

On constate qu'il sera plus intéressant d'utiliser l'énergie photovoltaïque avec l'aide de l'état, que de raccorder les zones isolées et lointaines (avec une densité faible de population) au réseau d'électricité conventionnelle, qui se fait avec des coûts très élevés.

III.6 Dimensionnement de pompage PV simplifié avec Excel

Le dimensionnement de systèmes de pompage solaire peut être un processus complexe et fastidieux, nécessitant des calculs et des ajustements minutieux pour s'assurer que le système fonctionne efficacement. C'est là qu'un programme Excel de dimensionnement de pompage PV peut être d'une grande aide.

Un tel programme peut vous aider à calculer rapidement les besoins en énergie de votre pompe solaire, en fonction de divers paramètres tels que la taille du réservoir, la hauteur de la tête de pompage et l'ensoleillement de votre région. Il peut également vous aider à choisir le bon panneau solaire et la bonne batterie pour votre système de pompage, afin de maximiser l'efficacité et de minimiser les coûts.

Notre programme Excel présente une interface avec sept icônes dédiées au calcul et au dimensionnement de pompes solaires PV, telles que représentées dans la figure ci-dessous

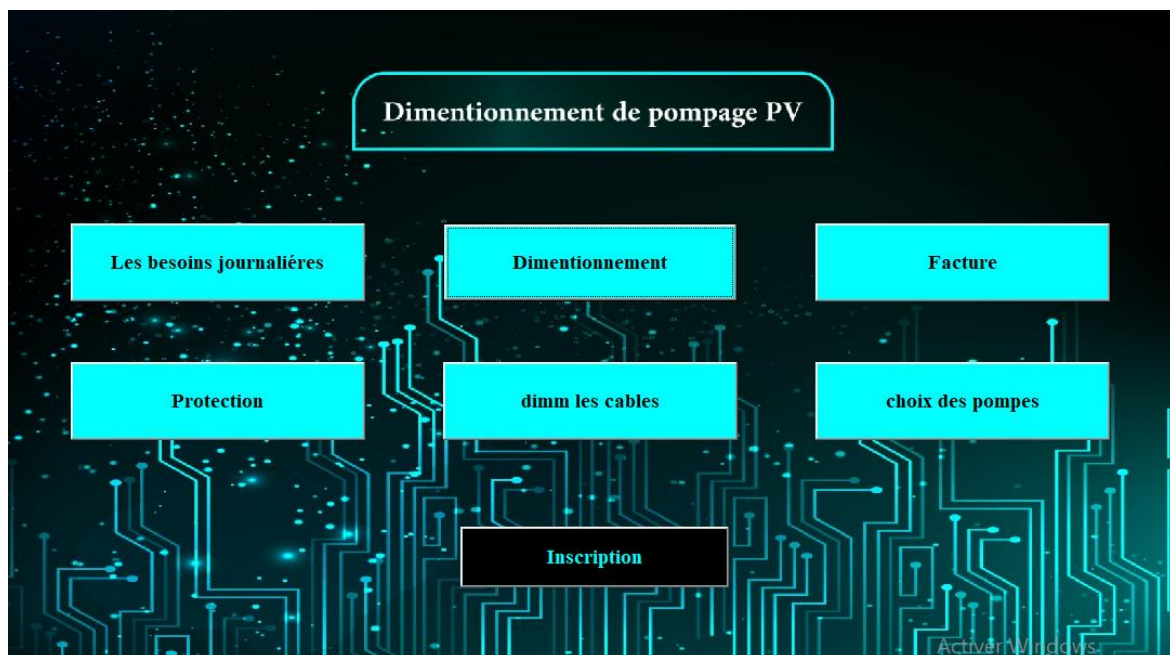


Figure II.13 L'interface de programme EXCEL.

1. **Le besoins journalières** : Cette icône vous permet de calculer le besoin total d'eau, grâce à un tableau que nous avons développé pour inclure les éléments les plus courants dans les zones isolées, ainsi que le pourcentage du besoin en eau correspondant à chacun de ces éléments.

<i>Accueil</i>			
BESOIN DE L'EAU			
	Nombre	Besoins (L/j)	Total besoins (L/j)
Personnes	10	30	300
Bœuf	0	10	0
Mouton / Chèvre	1688	15	25320
Cheval	30	50	1500
Ane	0	5	0
Chameau	797	6	4782
Chats	0	7	0
/	0	0	0
/	0	0	0
		Total	31902

Figure II.14 Le besoins journalières.

2. **Inscription** : Notre interface de saisie de données clients Excel vous permet de facilement enregistrer et gérer les informations de vos clients. Vous pouvez enregistrer les détails tels que le nom complet du client, son adresse, son numéro de téléphone et son adresse e-mail. L'utilisation de cette interface facilite la gestion de vos clients et vous permet de mieux comprendre leurs besoins et de leur offrir un meilleur service

The image shows a registration form interface with a dark background featuring a glowing blue circuit board pattern. The form consists of three input fields with labels in red boxes: 'Nom et Prénom', 'Adress Email', and 'TEL'. Below the input fields are three buttons: 'Enregistrer', 'Dimentionnement', and 'Exit', all with red backgrounds and white text.

Figure II.15 Inscription.

3. Dimensionnement Cette icône vous permet de réaliser une étude complète de dimensionnement de pompage PV. Cette étude comprend plusieurs éléments, tels que le calcul de l'énergie électrique et hydraulique, de la puissance crête, du nombre de panneaux solaires, etc.

<i>Accueil</i>								
Client	Nom et prénom		Etude d'un système de pompage solaire			El oued		
Tel	658173931					Date	13/03/2023	
Adress	Région ELKARMA					Etude N°	1	
LES DONNEES DE SITE								
Lieu de l'installation	L'irradiation	HMT	Besoins			Inclinaison	Azimet	
Reguiba	5	46,2	32	m ³ /jour	6,4	m ³ /heure	30	0
Pompage photovoltaïque								
Energie hydraulique		4028,64	KWH/jour	Energie électrique		6714,4	KWH/jour	
Champ photovoltaïque								
Puissance des modules	535	Wc	Puissance crête calculer			2238,133333	KWc	
Nombre max de module en série	8,71559633	PVs	tension moyen onduleur			285	PVs	
Nombre min de module en parallel	2	PVs	tension moyen de panneau			32,7	PVs	
			Nombre des panneaux PV			17,43119266	PVs	

Figure II.16 Dimensionnement.

4. Facture Cette icône est un facture Excel est conçue pour faciliter la gestion de vos transactions financières. Elle comprend plusieurs éléments essentiels, tels que le nom et l'adresse du client, la date d'émission de la facture, le numéro de la facture, ainsi que les produits ou services achetés et leur coût unitaire. La facture Excel calcule automatiquement le montant total dû en additionnant les coûts de chaque produit ou service et possibilité d'imprimer de cette facture. En utilisant notre facture Excel, vous pouvez facilement suivre vos transactions et améliorer votre gestion financière.

Facture			
Date de facturation	2023/05/19	Numéro de facture	1
Client	Oussama mamme	TEL	
Désignation	Quantité	Prix unitaire DA	Total
Onduleur + régulateur	1	27000	27000
panneaux	18	13000	234000
pompe immergé	1	80000	80000
cables et accessoires	1	60000	60000
Installation + GCv	1	75000	75000
Prix total (DA)			476000
La suspension de l'état %			45
Prix total après la suspension (DA)			214200
Enregistrer le facture			
Imprimer le facture			
Accueil			

Figure II.17 Facture.

La figure ci-dessous présente un exemple de facture

Entreprise : Dimmensionnement de pompage PV				
Facture de vente				
Client	Oussama mammeri	Numéro de facture	1	
TEL		Date	19/05/2023	
Numéro	Désignation	Qte	Prix unitaire DA	Totale DA
1	Onduleur + régulateur	1	27000	27000
2	panneaux	18	13000	234000
3	pompe immergé	1	80000	80000
4	cables et accessoires	1	60000	60000
5	Installation + GCv	1	75000	75000
6				
Prix totale DA				476000
Accueil				

Figure II.18 Exemple de facture.

III.7 Conclusion

A la fin de ce chapitre, nous nous proposons d'examiner le climat climatique d'El-OUED pour une année complète, dans une analyse des niveaux d'humidité, chaleur, etc., afin de terminer comment exploiter au mieux ce climat pour produire et fournir de l'énergie pour l'irrigation pastorale dans la mesure du possible.

Nous avons montré l'algorithme de dimensionnement d'un système photovoltaïque de pompage que nous avons appliqué à un béton d'irrigation de palmiers dans la région d'El-OUED. Nous avons également mené une analyse économique pour contrôler l'efficacité de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque par rapport à l'énergie conventionnelle.

IV

CHAPITRE IV

Maximisation de l'efficacité énergétique dans l'irrigation grâce à l'optimisation du pompage photovoltaïque

Nombre Des Pages : 20

IV.1 Introduction

Il existe des stratégies de commande spécifiques conçues pour amener les dispositifs à fonctionner à leur performance maximale, même si le point de performance maximal est inconnu à l'avance, ou s'il a été modifié sans préavis ou sans explication. Dans le cas des sources d'énergie, cela correspond à leur point de puissance maximale. Ces techniques de commande sont communément appelées « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou « Maximum Power Point Tracking » (MPPT) dans la littérature technique. Le principe de ces techniques est de trouver le point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une adaptation optimale entre le générateur et sa charge, de manière à maximiser le transfert de puissance. [51]

IV.2 Principe de la commande MPPT

En utilisant une commande MPPT associée à un étage intermédiaire d'adaptation, il est possible de faire fonctionner un générateur photovoltaïque (GPV) de manière à produire en permanence sa puissance maximale, comme le stipule sa définition. Ainsi, quelle que soit la variation des conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur permet de placer le système au point de fonctionnement maximum (V_{PPM} et I_{PPM}). Pour optimiser la chaîne de conversion photovoltaïque, un convertisseur statique (CS) est utilisé et est commandé par la commande MPPT [54]. Il peut être représenté par le schéma de la Figure IV.1.

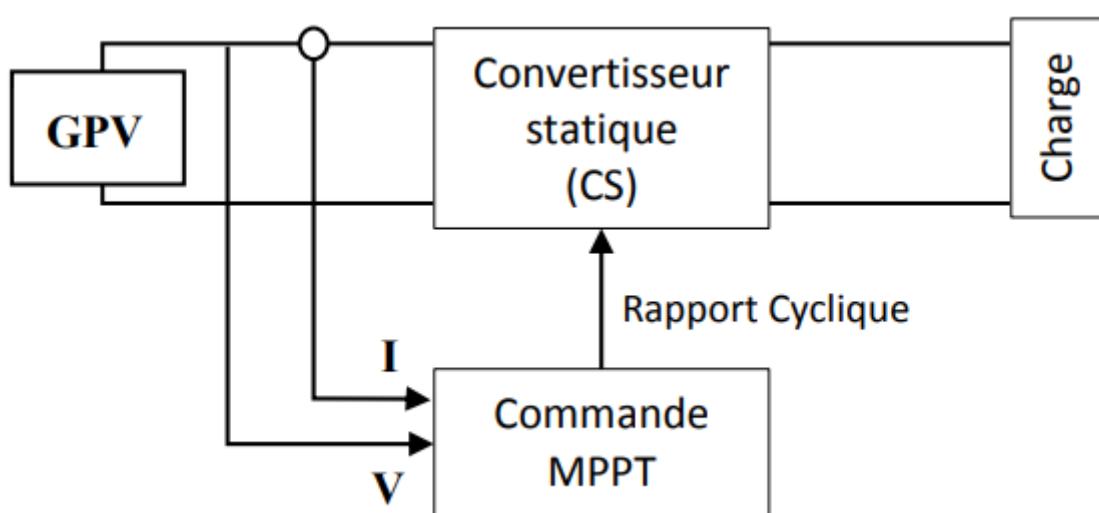


Figure IV.1 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge. [54]

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPPT [55].

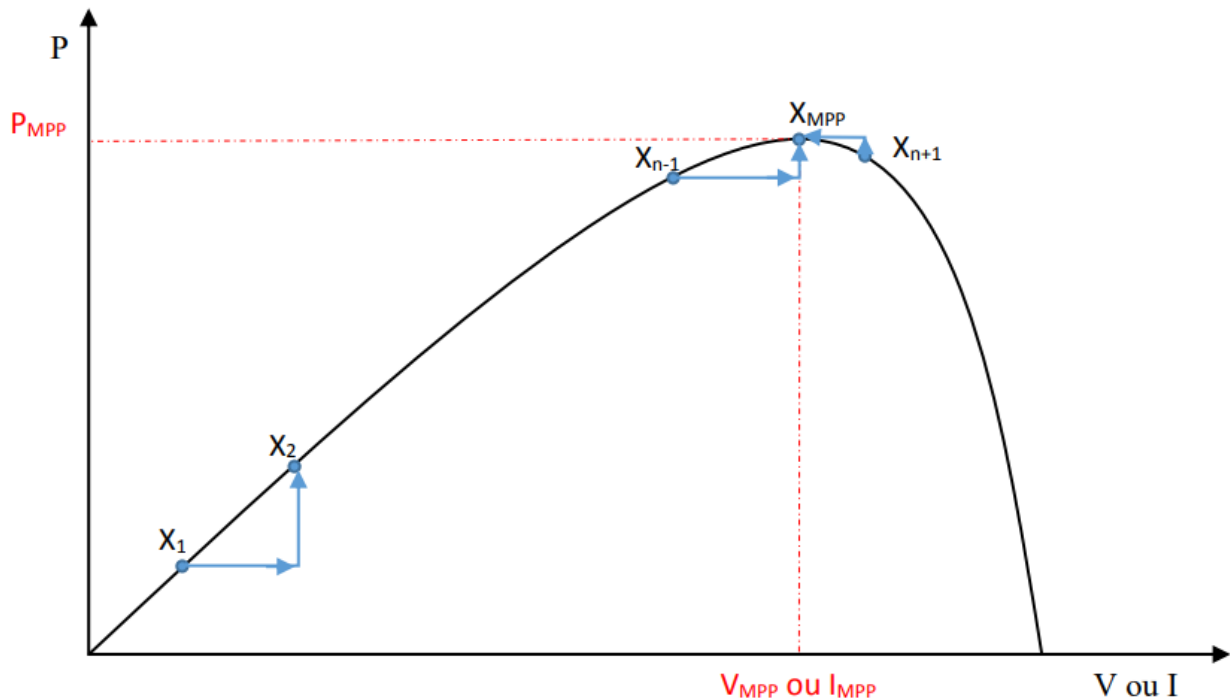


Figure IV.2 Principe de la commande MPPT. [54]

IV.3 Classification Des Commandes MPPT

En général, les commandes MPPT peuvent être classées en fonction de leur implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Toutefois, il est plus pertinent de les classer en fonction du type de recherche effectuée et des paramètres d'entrée de la commande MPPT.

IV.3.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée

1) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de Perturb&Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le

GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien Les commandes qui sont basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{OPT} et I_{OPT}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{OC} et I_{CC}). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction [56].

2) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial [54].

IV.3.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche

1) MPPT Indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} ou V_{oc}), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [54-57].

2) MPPT Direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des

changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction [54-57].

IV.3.3 Les algorithmes MPPT

Les algorithmes MPPT (Maximum Power Point Tracking) sont utilisés pour maximiser la production d'énergie des panneaux solaires en ajustant leur point de fonctionnement optimal en fonction des conditions de lumière et de température. Voici quelques exemples d'algorithmes MPPT :

Perturbation et observation (P&O) : Cet algorithme mesure la puissance de sortie du panneau solaire à intervalles réguliers et modifie la tension d'entrée du convertisseur DC-DC jusqu'à ce que la puissance maximale soit atteinte. Il perturbe la tension de manière répétée en ajoutant ou en soustrayant un petit montant de tension, puis observe la puissance de sortie pour déterminer si la tension doit être augmentée ou diminuée.

Incrémentation conductance (InC) : L'algorithme Incrémentation conductance mesure la conductance instantanée du panneau solaire et ajuste la tension d'entrée pour maximiser la conductance. La conductance est déterminée en calculant la pente de la courbe caractéristique courant-tension du panneau solaire.

Perturbation adaptative en boucle fermée (ALP) : L'algorithme ALP utilise une perturbation en boucle fermée pour déterminer le point de puissance maximale. Il mesure la puissance de sortie et ajuste la tension d'entrée jusqu'à ce que la puissance maximale soit atteinte. Le contrôleur ajuste ensuite la fréquence de la perturbation en fonction de l'écart de puissance par rapport au point de puissance maximale pour réduire le temps de réponse.

Fuzzy logic (FL) : L'algorithme FL utilise des règles de logique floue pour ajuster la tension d'entrée du convertisseur DC-DC. Les règles sont définies en fonction des mesures de tension et de courant du panneau solaire, ainsi que des valeurs de référence pour la puissance et la tension.

Ces algorithmes peuvent être utilisés dans des systèmes autonomes ou connectés au réseau pour maximiser l'efficacité énergétique des panneaux solaires.

IV.3.3.1 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=VI$) [54]. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV [58].

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension V_{PV} , ce qui engendre une variation de la puissance. Figure IV.5 montre qu'on peut déduire que 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 dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P(V)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié [54].

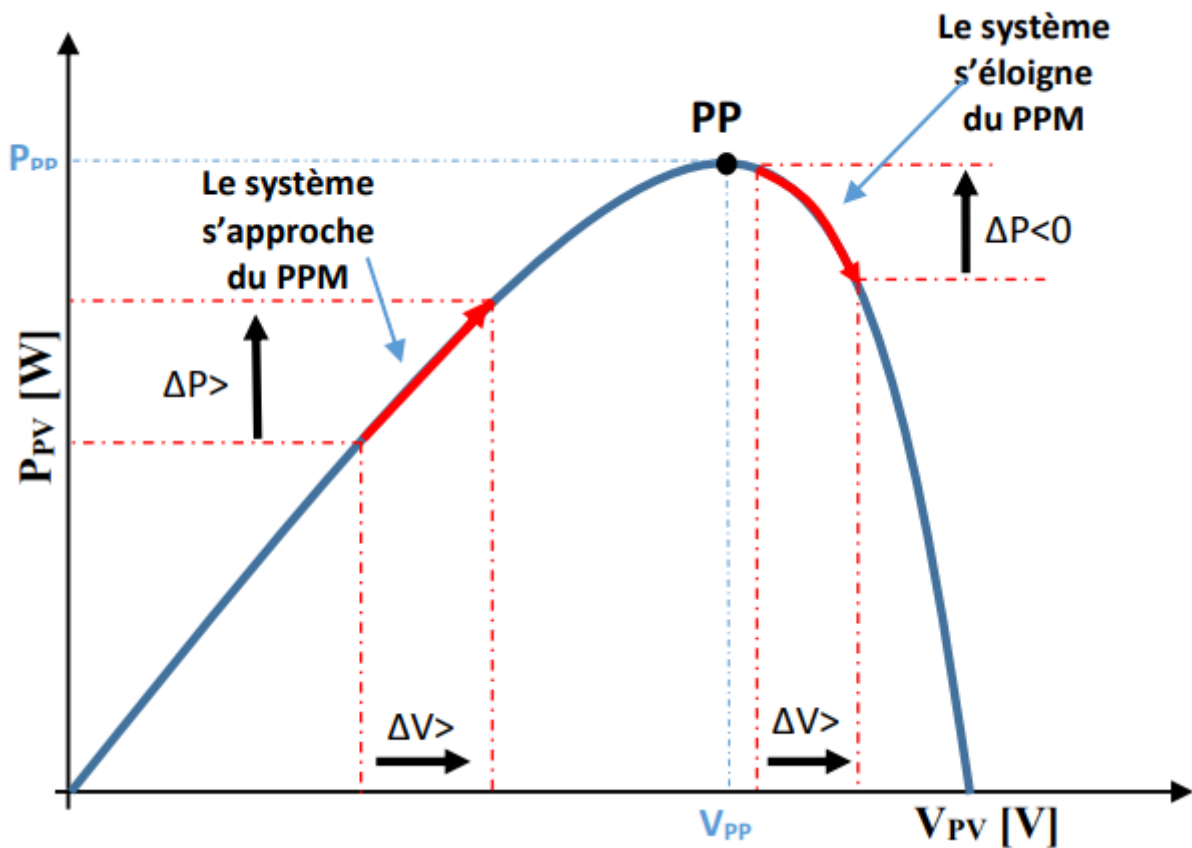


Figure IV.3 Recherche du PPM par la méthode (P&O). [54]

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $p(v)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant. L'utilisation d'un microprocesseur est plus appropriée pour la réalisation de la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent être utilisés [59].

La Figure IV.4 dans la page suivante illustre l'algorithme traditionnel d'un contrôleur MPPT basé sur la méthode Perturbation et Observation (P&O), dans lequel la variation de la puissance est évaluée après chaque perturbation de la tension d'entrée.

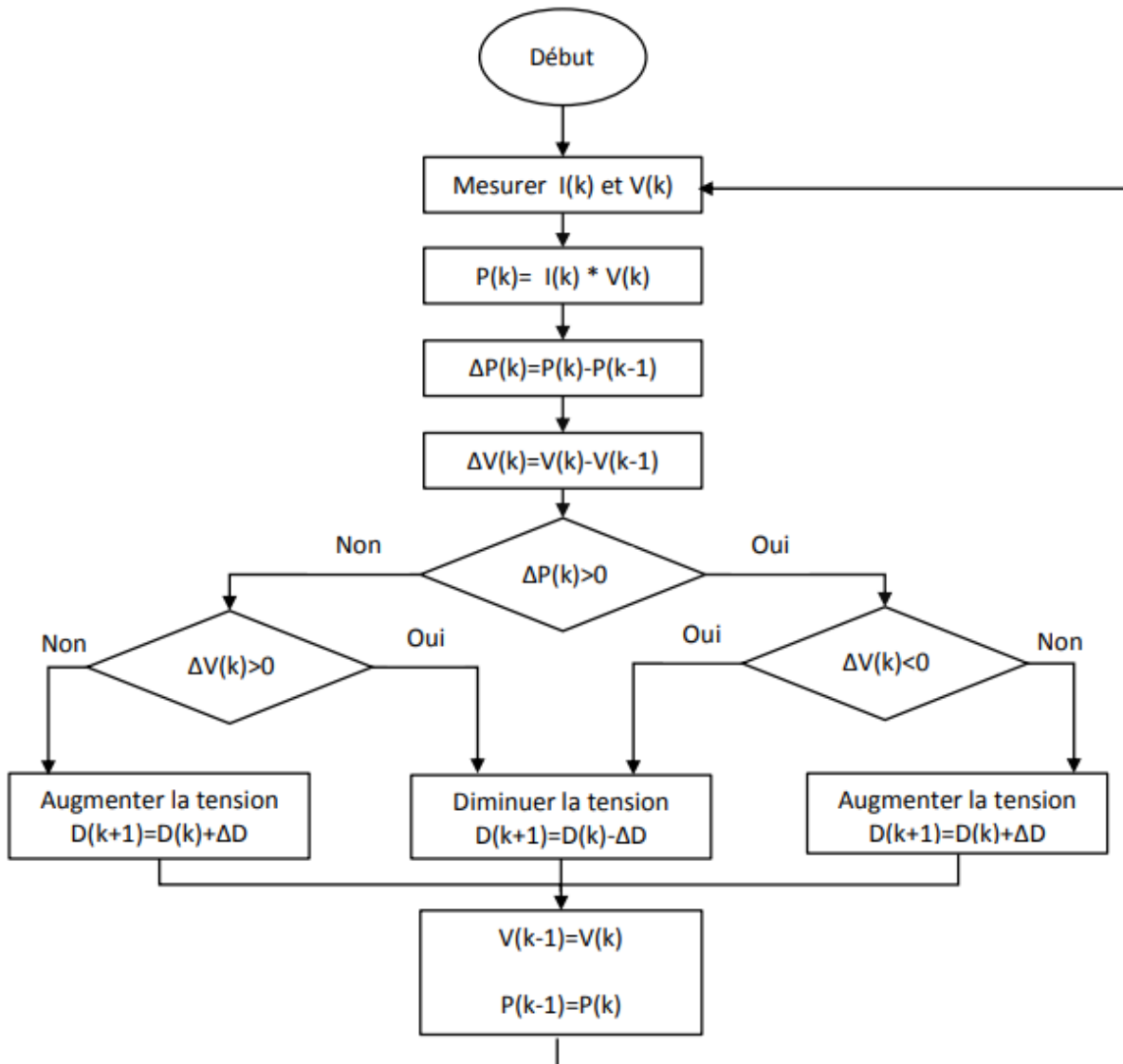


Figure IV.4 L'algorithme de P&O classique. [54]

Bien que la méthode P&O soit populaire en raison de sa simplicité d'implémentation, elle présente certains inconvénients tels que des oscillations persistantes autour du Point de Puissance Maximale (PPM) lorsque le système atteint son état stationnaire. Cela est dû à la nécessité de répéter périodiquement la procédure de recherche du PPM, ce qui force le système à osciller constamment autour de cette valeur optimale [60]. Ces oscillations dépendent de la largeur du pas de la perturbation [54] :

- Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.

Afin de pallier les limites de la méthode P&O de base, des variantes améliorées de l'algorithme ont été développées :

On pourra ajouter le poids d'un troisième point et le comparer aux deux autres avant de prendre une décision sur le sens de la perturbation. L'algorithme de cette méthode (the three-point weight comparison) a été présenté dans la Figure III.8 avec les trois points sont point actuel A, un point B perturbé d'un point A et un point C doublement perturbée dans le sens opposé du point B [56].

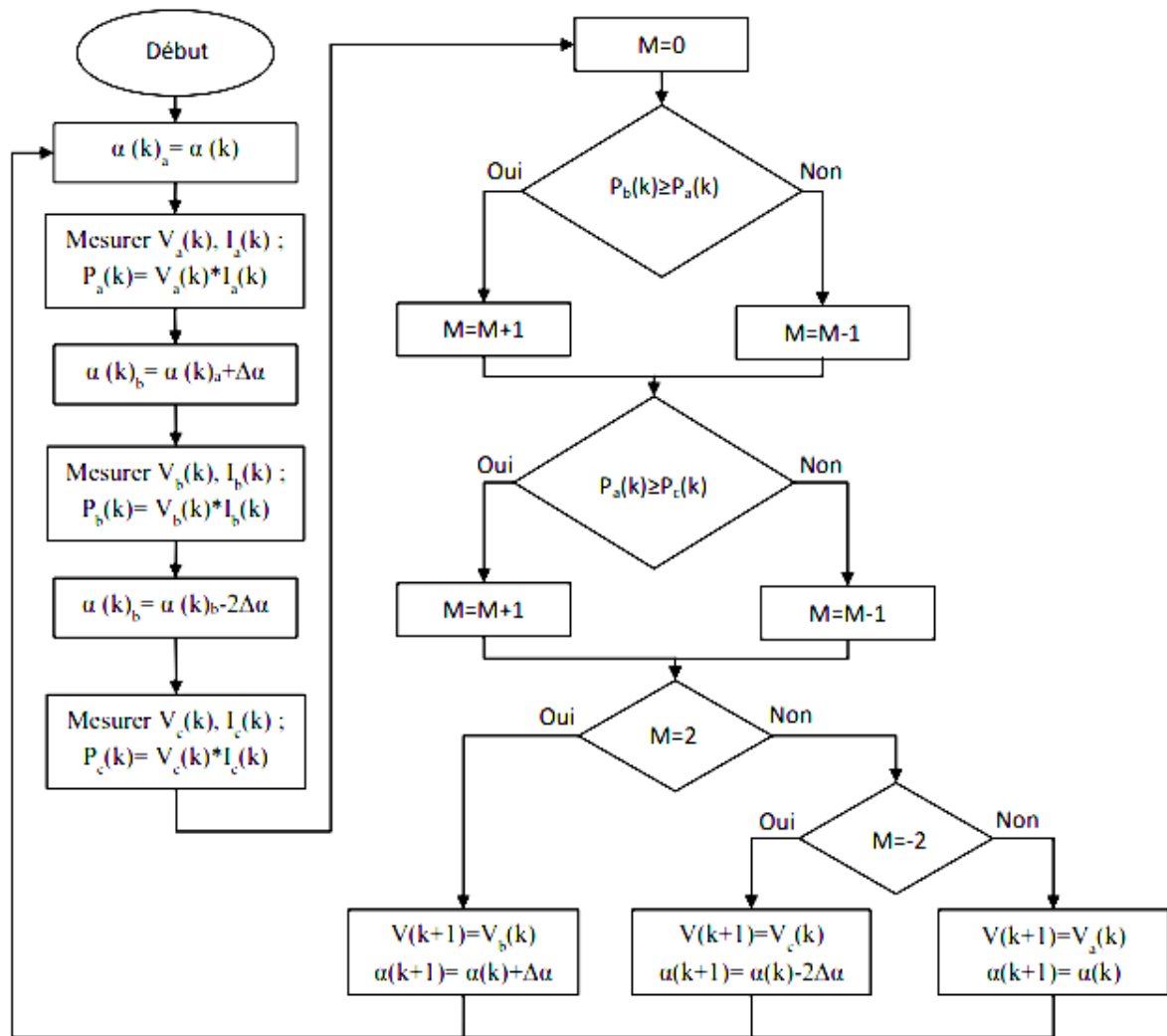


Figure IV.6 Algorithme du poids d'un troisième point. [54]

Une autre solution sera de garder le même algorithme de la méthode p&o classique sauf que le pas de perturbation est variable .où plusieurs échantillons de puissance P_{pv} est utilisé pour ajuster dynamiquement l'amplitude de la perturbation de manier qu'il est diminué quand il est proche du point maximum. Certain études propose que le pas soit [54]:

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) \pm N \times \left| \frac{P(k)-P(k-1)}{V(k)-V(k-1)} \right| \quad (\text{IV-1})$$

La recherche dans ce domaine est toujours en cours.

IV.3.3.2 La Commande MPPT Flou

Grâce aux avancées de l'informatique et à la puissance des microprocesseurs, il est possible d'utiliser la commande par logique floue (LF) dans le contrôleur MPPT. Bien que cette méthode ne soit pas obligatoire pour le modèle de système, elle offre de meilleures performances en permettant de traiter parfaitement les changements de point de fonctionnement, les non-linéarités et les incertitudes telles que les quantités physiques non modélisées [5]. Cependant, pour utiliser la LF, le concepteur doit avoir une connaissance préalable de la façon dont le produit réagit aux entrées, de manière qualitative.

IV.3.3.2.1 Principe de la logique floue

En 1965, le professeur Lotfi Zadeh a proposé la logique floue, une branche des mathématiques qui permet aux ordinateurs de modéliser le monde réel de manière similaire aux êtres humains [15]. La logique floue s'intéresse à la quantification et au raisonnement en utilisant un langage qui permet des définitions ambiguës, telles que "beaucoup", "peu", "petit", "haut" ou "dangereux". Elle est particulièrement utile pour traiter des situations où la question posée et la réponse obtenue impliquent des concepts imprécis ou vagues.

La logique floue postule que le raisonnement approximatif est une généralisation du raisonnement exact, et que tout peut être considéré comme un degré. Ainsi, tout système logique peut être formulé de manière floue. Dans cette approche, les connaissances sont considérées comme une collection de contraintes souples ou imprécises portant sur un ensemble de variables [17]. L'inférence est un processus de propagation de contraintes élastiques. La logique floue permet d'accommoder le concept de vérité partielle : des valeurs entre complètement vrai et complètement faux sont admises [5]. Elle supporte des modes de raisonnement approximatifs plutôt qu'exacts. Son importance provient du fait que le raisonnement humain est approximatif.

La définition de Zadeh [15-17]:

Fuzzy Logic is determined as a set of mathematical principles for knowledge representation based on degrees of membership rather than on crisp membership of classical binary logic.

IV.3.3.2.2 Théorie des ensembles flous

La théorie des ensembles flous se fonde sur la notion d'appartenance partielle, ce qui signifie que chaque élément peut appartenir partiellement ou de manière graduelle aux ensembles flous qui ont été définis. [15]

On peut définir un ensemble flou A dans X en utilisant une fonction d'appartenance qui attribue à chaque élément x de X un degré d'appartenance $\mu_A(x)$ compris entre 0 et 1. Ce degré mesure dans quelle mesure l'élément x appartient à l'ensemble A [2]. Donc un ensemble flou peut être représenté par un ensemble de paires ordonnées comme suit :

$$A = \{x, \mu_A(x) / x \in X \quad (\text{IV-2})$$

Où

X : Univers de discours (intervalle de variation de variable x), il peut contenir des valeurs discrètes ou continues.

$\mu_A(x)$: Fonction d'appartenance d'un variable x .

- Si X est continue :

$$A = \frac{\int \mu_A(x)}{x} \quad (\text{IV-3})$$

- Si X est discrète :

$$A = \frac{\sum \mu_A(x)}{x} \quad (\text{IV-4})$$

IV.3.3.2.3 Théorie des ensembles flous

Les opérateurs flous décrivent l'interaction entre des ensembles flous. Dans ce paragraphe, nous examinerons quelques opérations courantes telles que le complément, l'intersection et l'union [2].

- **Intersection** de deux ensembles, en logique floue, est un peu différente des méthodes classiques. Elle cherche à savoir de combien un élément est-il dans les deux ensembles. Alors pour calculer l'intersection, la valeur minimale d'appartenance est utilisée :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{IV-5})$$

- **Complément** permet de vérifier de combien un élément n'appartient pas à un ensemble. Si A est l'ensemble flou, son complément ($\neg A$) est :

$$\mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{IV-6})$$

- **Union** en logique floue, est le contraire de l'intersection. Le processus de l'union cherche à savoir de combien un élément est-il dans l'un des deux ensembles. Alors, la valeur maximale d'appartenance doit utiliser :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{IV-7})$$

IV.3.3.2.4 Conception du contrôleur flou

La Figure IV.2 sur la page suivante présente le processus d'un contrôleur LF qui se compose de trois blocs fonctionnels : *la fuzzification, l'inférence des règles et la défuzzification*. De plus, il y a une base de données appelée le tableau des règles qui contient les règles conçues. L'inférence floue (ou inférence des règles) est le processus par lequel le contrôleur LF effectue des calculs à partir du tableau des règles pour générer la sortie [2-15].

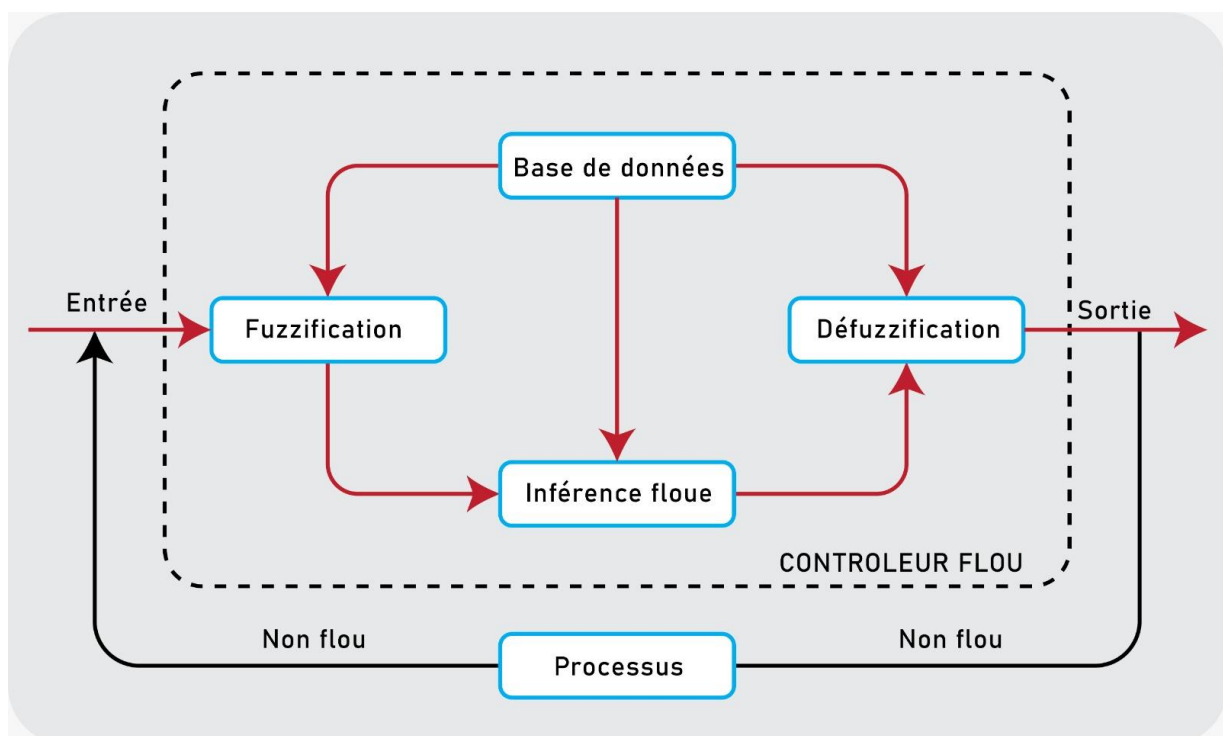


Figure IV.7 Schéma fonctionnel de la commande par logique floue. [72]

- **La fuzzification** est la première étape du processus, elle consiste à convertir les valeurs d'entrée, souvent numériques et précises, en variables floues qui peuvent prendre des

valeurs dans un intervalle continu. Cela permet de prendre en compte les imprécisions et les incertitudes dans les valeurs d'entrée [2-15].

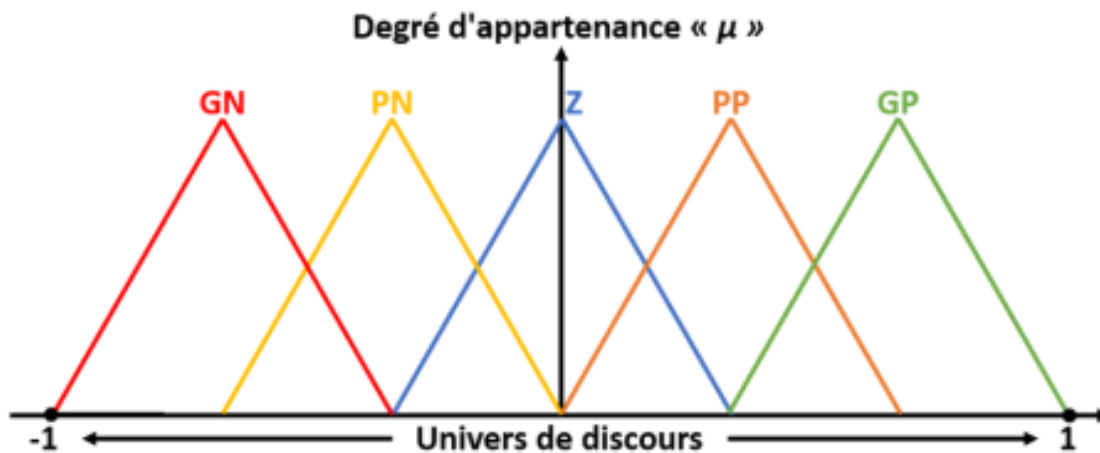


Figure IV.8 Fonctions d'appartenance floues. [15]

- **L'inférence des règles** est la deuxième étape, elle permet de prendre des décisions en utilisant des règles floues. Les règles sont généralement exprimées sous forme de «si-alors», où les conditions sont des variables floues d'entrée et la décision est une variable floue de sortie. L'inférence des règles utilise ces règles pour produire une sortie floue qui décrit la décision à prendre [2-15].
- **La défuzzification** est la dernière étape, elle consiste à convertir la sortie floue en une valeur numérique précise qui peut être utilisée pour contrôler le système. Cette étape est réalisée en trouvant le centre de gravité (ou centre de masse) de la sortie floue, ce qui permet d'obtenir une valeur numérique qui représente la décision à prendre [2-15].

IV.3.3.2.5 Types des systèmes flous

Deux catégories de systèmes flous sont identifiées en fonction de la syntaxe utilisée pour écrire les règles floues SI-ALORS.

- **Système flou de Takagi-Sugeno (TS)** : On dit que c'est un type procédural où seule l'entrée est floue. La sortie, qui représente la commande, est soit une constante réelle, soit une expression polynomiale non floue [2].
- **Système flou de Mamdani** : Ce type de système flou présente à la fois une entrée et une sortie floues. Après l'inférence, le résultat est représenté par un ensemble flou caractérisé par sa fonction d'appartenance. Pour obtenir une valeur réelle de la commande à appliquer, une étape de défuzzification est nécessaire [2].

IV.3.3.2.6 Algorithme P&O MPPT Basé Sur la Logique Floue Proposé

Comme la méthode P & O conventionnelle fonctionne généralement sur une perturbation de taille de pas fixe, il existe un conflit entre la minimisation de l'oscillation de la puissance de sortie de la matrice PV autour du MPP et la convergence du temps de montée vers le MPP lors de l'utilisation d'un MPPT de taille de pas fixe. Une grande taille de pas garantit une réponse dynamique plus rapide à un changement soudain de l'irradiance solaire, mais entraîne une oscillation excessive en régime permanent de la puissance de sortie du générateur PHOTOVOLTAÏQUE autour du MPP et entraîne une perte de puissance. La petite taille de pas assure moins d'oscillation de la puissance de sortie du réseau PHOTOVOLTAÏQUE autour du MPP, mais entraîne une réponse dynamique plus lente à un changement soudain de l'irradiance solaire. [69]

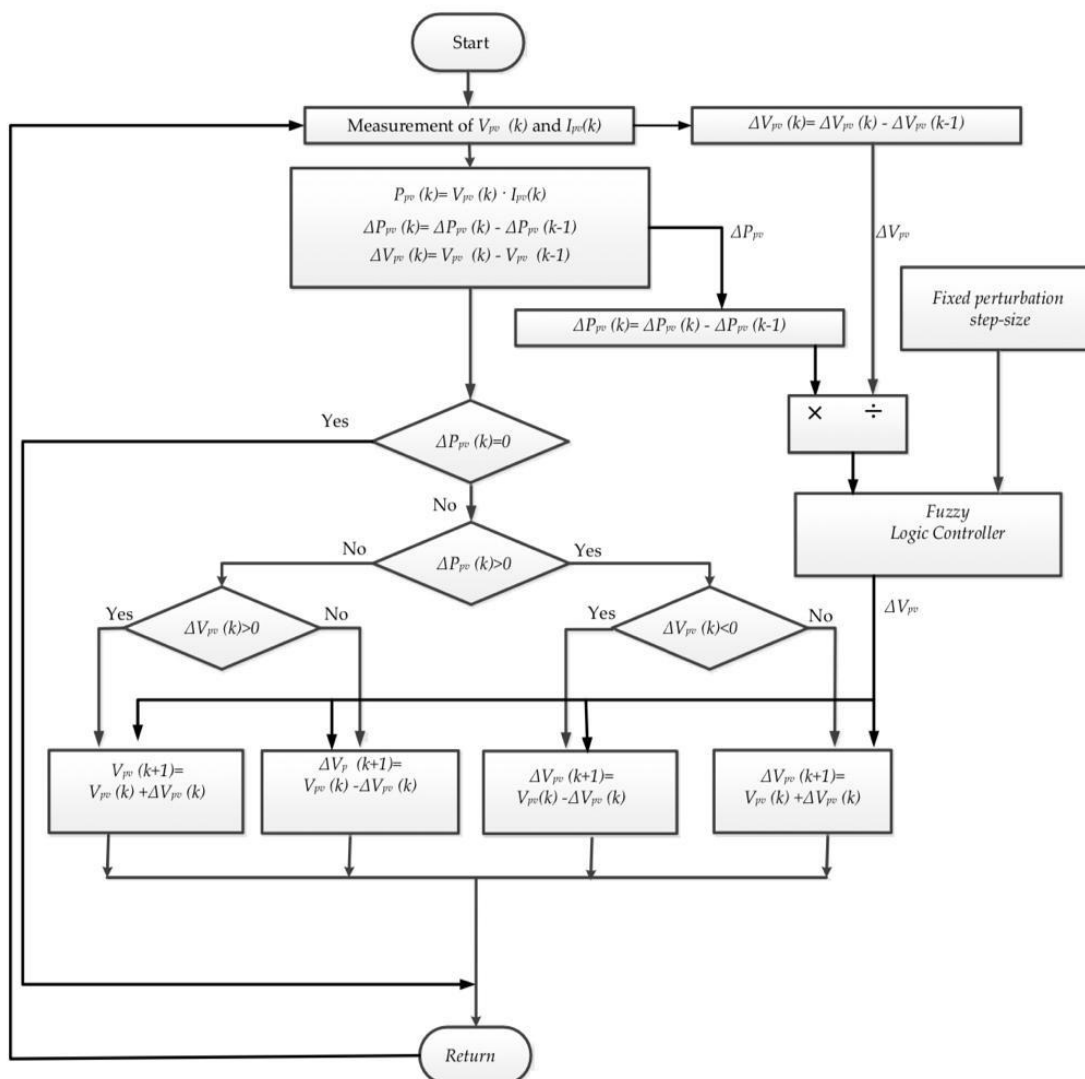


Figure IV.9 Algorithme P&O MPPT Basé Sur la Logique Floue. [69]

IV.4 Modélisation de la régulation de puissance maximale des panneaux solaires via MATLAB/SIMULINK

IV.4.1 Modèle SIMULINK du contrôleur MPPT à base de P&O

Pour valider la mise en œuvre de l'algorithme recommandé, un modèle MATLAB/Simulink a été développé, comme illustré dans la figure II.18. Ce modèle est composé d'un module de générateur PV ainsi que d'une commande de convertisseur DC-DC Boost avec une commande MPPT (contrôleur MPPT et générateur PWM) connectée à la charge. L'ensemble est implémenté dans l'environnement Matlab/Simulink.

La simulation du générateur photovoltaïque a été réalisée dans l'environnement MATLAB, avec une irradiation de 1000 W/m^2 et une température de 25°C . L'algorithme MPPT a été implémenté en utilisant le codage de l'organigramme, ce qui a permis de faciliter la compréhension et la mise en œuvre des modifications dans l'algorithme conventionnel.

Le contrôle du convertisseur élévateur DC-DC, basé sur des Mosfet, était réalisé par le signal de grille, qui était déterminé par l'algorithme P&O recommandé. Le convertisseur élévateur DC-DC basé sur Mosfet était contrôlé par le signal de grille qui a été décidé par l'algorithme P&O proposé. Le convertisseur élévateur se composait de $1147.8 \mu\text{H}$ de l'inductance et de $3227 \mu\text{F}$ du condensateur. la charge est résistance d'une valeur de 100Ω .

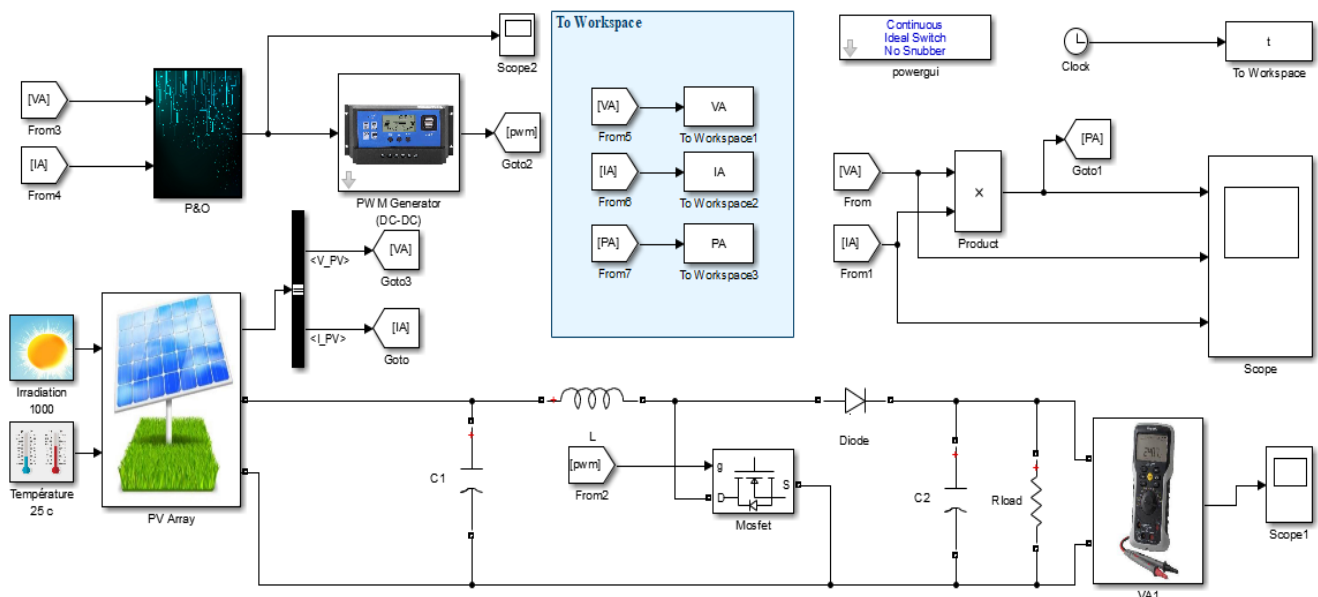


Figure IV.10 Conception du système d'optimisation.

IV.4.1.1 Résultats de simulation MPPT P&O

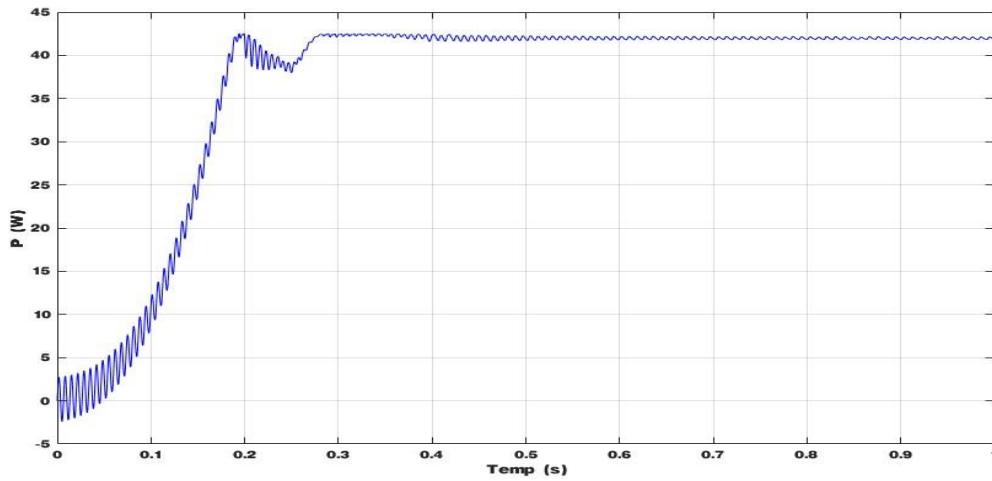


Figure IV.11 MPPT basé sur P&O : Profil d'extraction de puissance du panneau photovoltaïque.

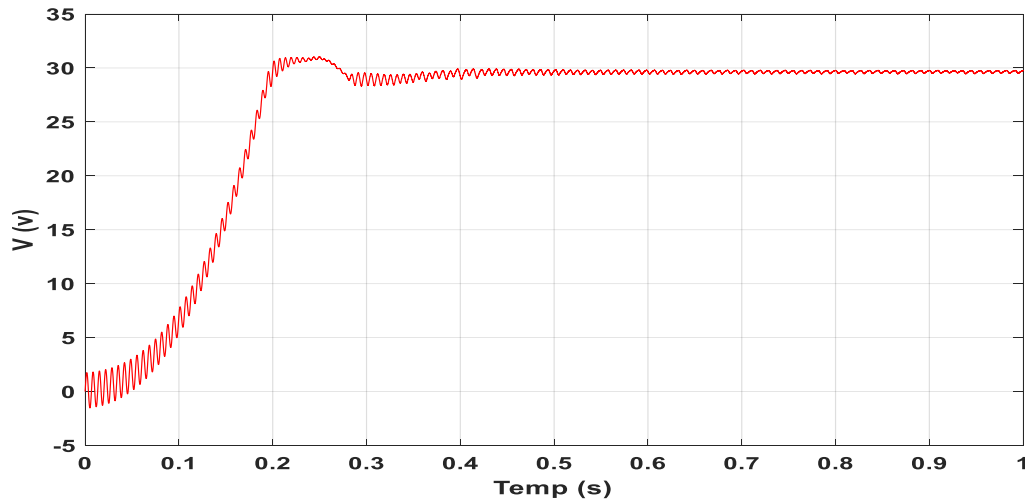


Figure IV.12 MPPT basé sur P&O : Profil d'extraction de tension du panneau photovoltaïque.

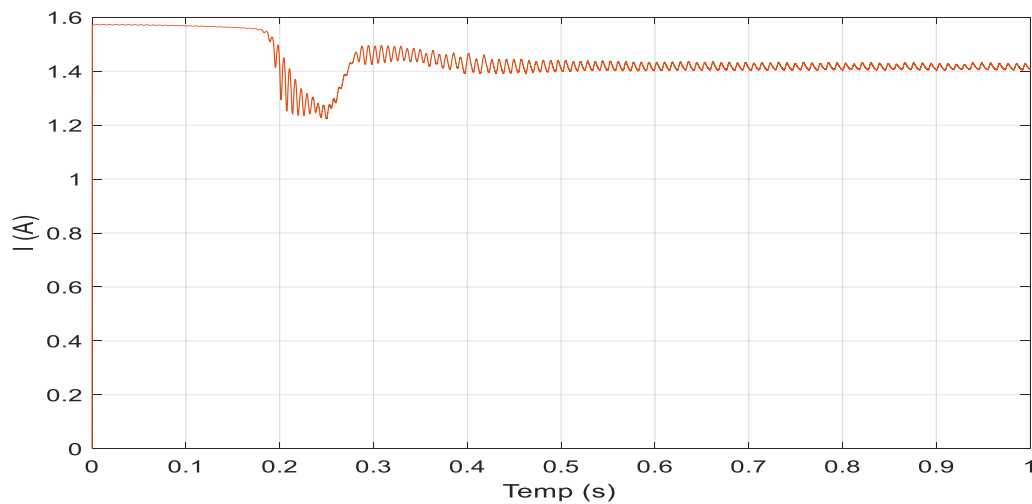


Figure IV.13 MPPT basé sur P&O : Profil d'extraction de courant du panneau photovoltaïque.

Les résultats que nous avons observés confirment le bon fonctionnement de l'unité de contrôle (P&O). Le contrôleur P&O présente un temps de réponse rapide.

En raison de sa simplicité et de sa rentabilité, le MPPT P&O peut être facilement implémenté pour suivre le point de puissance maximale d'un système photovoltaïque. Cependant, cette méthode présente certains inconvénients, tels qu'un suivi médiocre, notamment lors de changements soudains d'irradiance, et une convergence lente vers le point de puissance maximale. De plus, cette méthode entraîne des oscillations continues de la puissance de sortie du panneau photovoltaïque autour du point de puissance maximale en régime permanent. [69]

IV.4.2 Modèle SIMULINK du contrôleur MPPT à base de P&O optimiser par logique floue

La figure sur la page suivante montre le contrôle du générateur PV en utilisant l'algorithme P&O optimisé par la logique floue (FLC) qui a été étudié et développé à l'aide des outils de la bibliothèque de logique floue dans l'environnement MATLAB/SIMULINK.

Ce modèle est constitué d'un module de génération photovoltaïque et d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) avec un générateur PWM, qui est connectée à une charge. Le tout a été implémenté dans l'environnement MATLAB/Simulink.

La simulation du générateur photovoltaïque a été réalisée dans l'environnement MATLAB, avec une irradiation de 1000 W/m² et une température de 25°C. L'algorithme MPPT a été implémenté en utilisant le codage de l'organigramme, ce qui a permis de faciliter la compréhension et la mise en œuvre des modifications dans l'algorithme conventionnel.

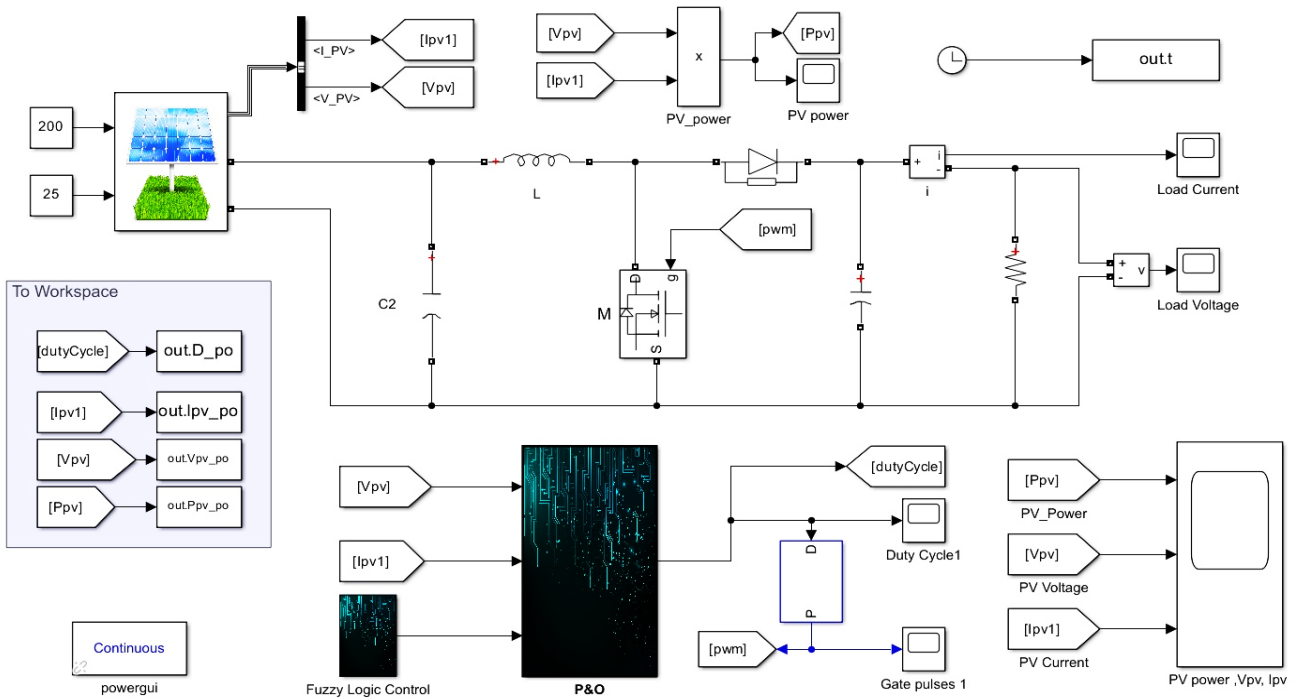


Figure IV.14 Conception du système d'optimisation.

La figure IV.15 présente le schéma de blocs (fuzzy logic control) réalisé à l'aide de MATLAB/SIMULINK.

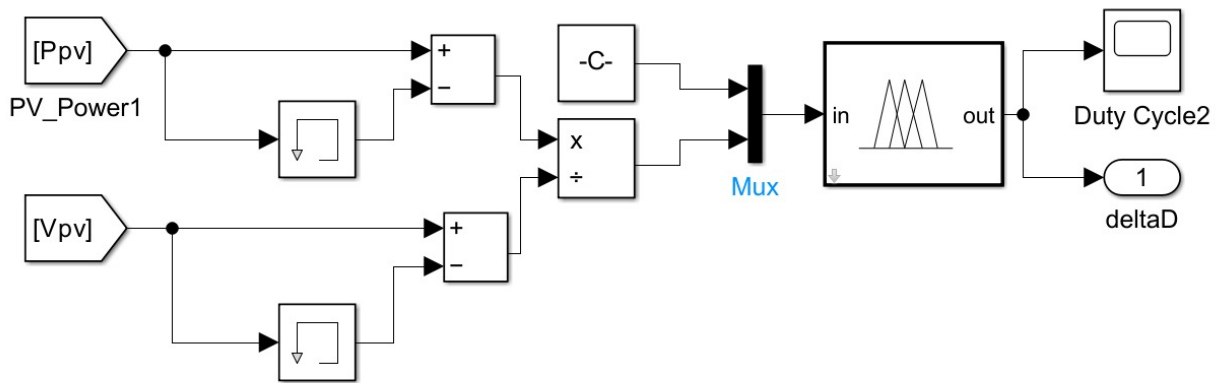


Figure IV.15 Fuzzy logic control.

IV.4.2.1 Résultats de simulation MPPT P&O

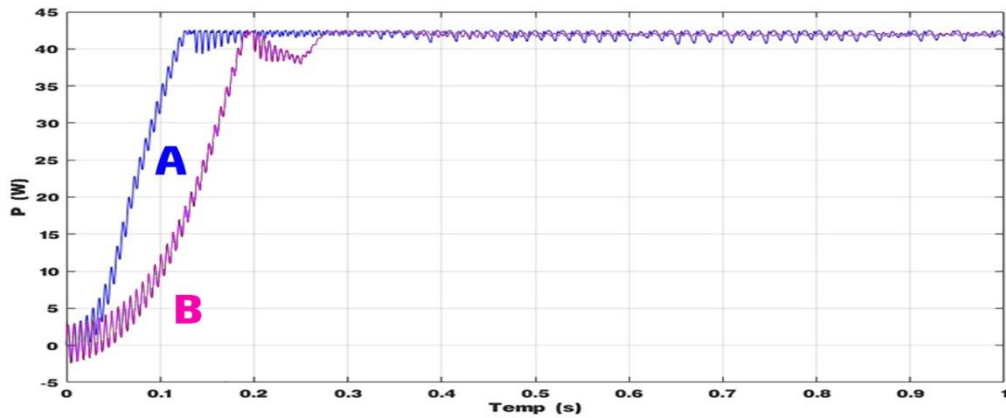


Figure IV.16 MPPT basé sur P&O optimisé par FLC : Profil d'extraction de puissance du GPV.

(A) MPPT P&O optimiser par logique floue ; (B) MPPT P&O.

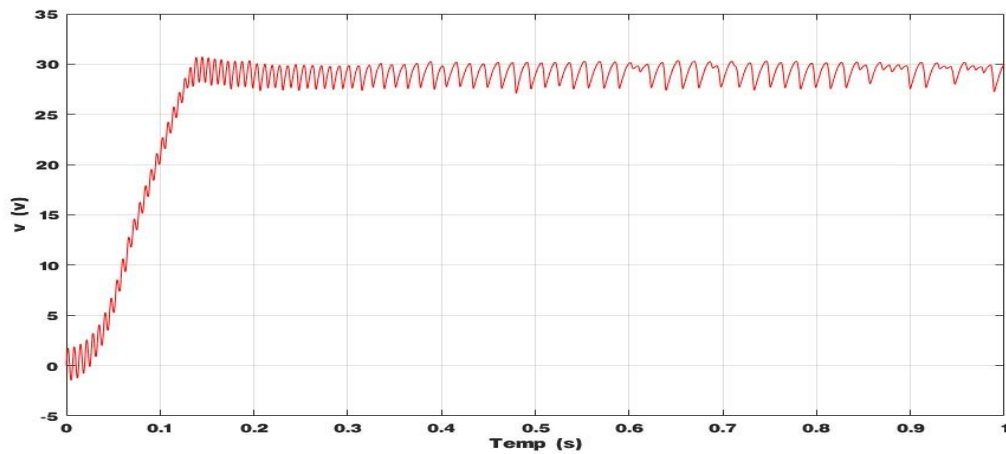


Figure IV.17 MPPT basé sur P&O optimisé par FLC: Profil d'extraction de tension du GPV.

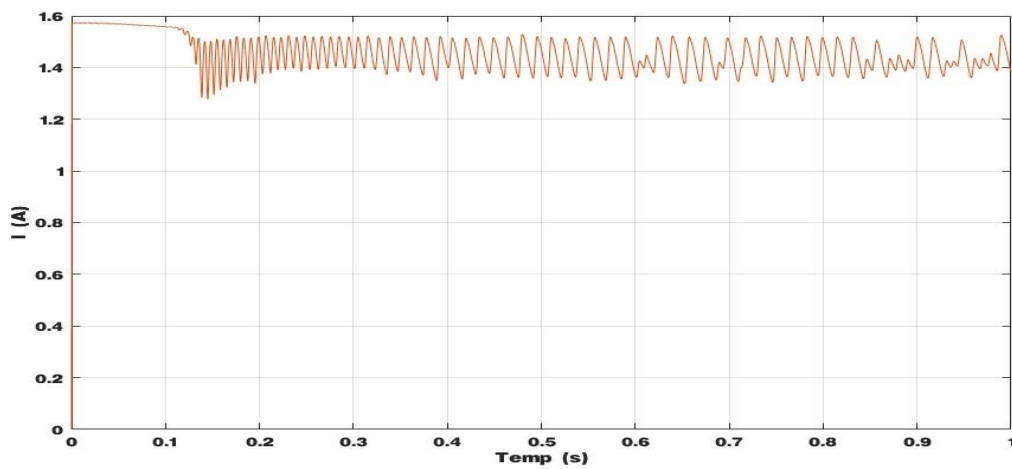


Figure IV.18 MPPT basé sur P&O optimisé par FLC: Profil d'extraction de courant du GPV.

En observant les figures précédentes, il est clair que la commande MPPT à base de p&o optimisé par la logique floue présente de nombreux avantages. Cette commande MPPT se distingue par sa robustesse, sa rapidité accrue en termes de temps de réponse et une précision supérieure, ce qui se traduit par une erreur très faible en régime stationnaire.

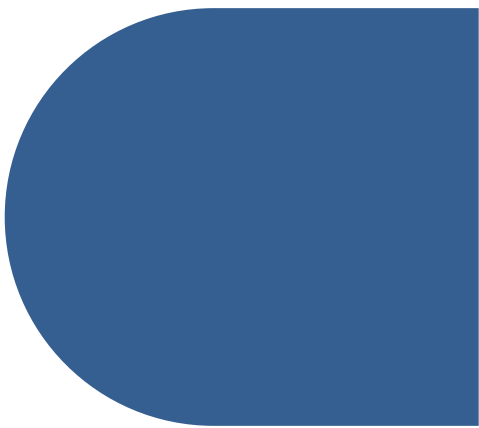
Les résultats obtenus grâce à la technique P&O optimisée par la logique floue proposée surpassent ceux obtenus avec les méthodes traditionnelles de P&O. Par conséquent, la commande basée sur la logique floue peut être considérée comme un moyen de rapprocher le contrôle mathématique précis et la prise de décision humaine. De plus, ces résultats confirment le bon fonctionnement de P&O, mais ils démontrent également une amélioration significative grâce à la commande floue. Lorsque ces deux méthodes sont combinées, les résultats obtenus confirment des performances supérieures, notamment une réponse rapide, une erreur très faible à l'état stationnaire et une quasi-absence de dépassement.

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit deux approches de commande pour le suivi du point de puissance maximal (MPPT). Nous avons présenté la méthode traditionnelle, à savoir l'algorithme P&O, ainsi que la méthode intelligente de commande MPPT floue. Pour mener nos expérimentations, nous avons mis en place les différents blocs de simulation nécessaires à l'aide du MATLAB /Simulink.

En utilisant des valeurs constantes d'ensoleillement et de température, nous avons obtenu des résultats comparatifs pour les deux approches : la commande MPPT p&o optimisée par logique floue et l'algorithme MPPT P&O. Ces résultats confirment le bon fonctionnement de l'algorithme MPPT P&O, mais ils révèlent également une amélioration notable grâce à la méthode P&O optimisée par la logique floue.

La simulation de la commande MPPT P&O optimisée par la logique floue a démontré des performances supérieures, notamment un temps de réponse rapide et une erreur très faible en régime stationnaire.



CONCLUSION GENERAL


CONCLUSION GENERAL

L'énergie photovoltaïque (PV) représente une technologie d'énergie renouvelable prometteuse et motivante pour la production future d'électricité et a récemment acquis une attention mondiale. En outre, les avantages de l'énergie photovoltaïque, tels que l'absence de coûts de carburant, de pollution atmosphérique et de bruit, ont stimulé la demande de ce type d'énergie dans de nombreuses applications, par exemple les systèmes de pompage d'eau dans les régions isolées et éloignées. Le mémoire offre une analyse approfondie et des solutions pertinentes pour améliorer l'efficacité et la durabilité des systèmes de pompage utilisant l'énergie solaire. Cette mémoire met en évidence l'importance de la conception adéquate des installations de pompage PV pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire et minimiser les pertes.

Tout d'abord, Le mémoire souligne l'importance de l'énergie solaire comme source d'énergie renouvelable pour les systèmes de pompage, offrant une alternative durable et économique aux méthodes de pompage traditionnelles. Il met en évidence les avantages environnementaux, économiques et sociaux de l'utilisation de systèmes de pompage PV, tels que la réduction des coûts de fonctionnement et l'amélioration de l'accès à l'eau dans les zones rurales éloignées.

Ensuite, nous abordons les différents aspects du dimensionnement en prenant en compte des facteurs tels que la localisation géographique, la demande en eau, les variations saisonnières, et les caractéristiques des panneaux solaires et des pompes. Les résultats obtenus grâce à des simulations et des analyses détaillées démontrent l'efficacité des méthodes de dimensionnement proposées.

Enfin, l'optimisation des systèmes de pompage PV est également abordée, mettant en évidence les techniques et les stratégies permettant d'améliorer les performances du système. L'optimisation fonctionnelle a consisté à adopter un contrôleur basé sur la méthode P&O, puis à l'optimiser à l'aide de la logique floue afin de préciser davantage la taille des pas et maximiser ainsi la puissance photovoltaïque obtenue. La simulation réalisée dans l'environnement MATLAB a démontré un fonctionnement stable du système avec une réponse rapide. Ainsi, des performances de haute qualité.



En conclusion, le mémoire fournit une contribution précieuse à la compréhension et à l'amélioration des systèmes de pompage solaire. Il offre des recommandations pratiques pour le dimensionnement et l'optimisation de ces systèmes, qui peuvent être utiles pour les concepteurs, les ingénieurs et les décideurs dans le domaine de l'énergie solaire et de l'approvisionnement en eau.



RÉFÉRENCES

Références

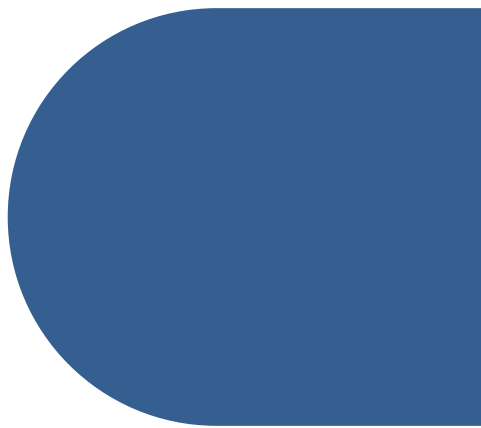
- [1] Clarence Semessou, AIDE A LA DECISION POUR LE CHOIX DE SITES ET SYSTEMES ENERGETIQUES ADAPTES AUX BESOINS DU BENIN, Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale de l'Université Bordeaux 1 ED 209, DECEMBRE 2011.
- [2] V. C. Sontake and V. R. Kalamkar, "Solar photovoltaic water pumping system-A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 1038-1067, Jun. 2016.
- [3] A. Moumi, N. Hamani , N. Moumi et A. Z. Mokhtari, « Estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de biskra » , SIPE8, 11 et 12 Novembre 2006, Béchar, Algérie.
- [4] K. Meah, S. Fletcher, and S. Ula, "Solar photovoltaic water pumping for remote locations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 2, pp. 472-487, 2008/02/01/, 2008.
- [5] I. Yahyaoui. "Specifications of photovoltaic pumping systems in agriculture : sizing, fuzzy energy management and economic sensitivity analysis," <http://www.mylibrary.com?id=968686>.
- [6] Energy Output Estimation for Small-Scale Wind Power Gerarators Using Weibull-Representative Wind Data". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 91 :693-707.
- [7] M. Iqbal. "An Introduction To Solar Radiation," <http://qut.ebib.com.au/patron/FullRecord.aspx?p=1154970>.
- [8] F. Vignola, J. Michalsky, and T. Stoffel. "Solar and Infrared Radiation Measurements, Second Edition," <https://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=5841776>
- [9] S. Kalogirou. "Mcevoy's handbook of photovoltaics fundamentals and applications."
- [10] P. Breeze, *Solar power generation*, 2016.
- [11] B. Fléche, D. delagnes, «énergie solaire photovoltaïque», STI ELT juin 200
- [12] A. P. Kirk, *Solar photovoltaic cells : photons to electricity*, London: Academic Press, 2015.
- [13] N. Kumar Moluguri, C. Rama Murthy, and V. Harshavardhan, "Solar Energy System and Design - Review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 3, no. 10, Part B, pp. 3637-3645, 2016/01/01/, 2016.
- [14] A. E. Dixon, and J. D. Leslie. "Solar Energy Conversion : an Introductory Course," <http://qut.ebib.com.au/patron/FullRecord.aspx?p=1630131>.

- [15] S. International Solar Energy, and Congress, "Advances in solar energy technology : Book of abstracts. Proceedings of the Biennial Congress of the International Solar Energy Society, Hamburg, Federal Republic of Germany, 13-18 September 1987."
- [16] M. J. Mohana Rao, M. Kumar Sahu, and P. Kumar Subudhi, "Pv based water pumping system for agricultural sector," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 1, Part 1, pp. 1008-1016, 2018/01/01/, 2018.
- [17] T. T. Chandratilleke, and J. C. Ho, "A study of a photovoltaic array for water pumping," *Solar & Wind Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 59-71, 1986/01/01/, 1986.
- [18] [acf pompage solaire conception et realisation de la partie electrique du pompage guide 2020.pdf \(agencemicroprojets.org\)](#)
- [19] Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller, Bocar Sada Sy « le pompage photovoltaïque, manuel de cours à l'intention des ingénieurs et techniciens » Institut de l'énergie des pays ayant en commun l'usage français, 1998
- [20] Fondation Energie pour le monde et peuples solidaires, « Energie solaire photovoltaïque », Paris, juin 2005
- [21] A. H. A. Al-Waeli, K. Sopian, H. A. Kazem, and M. T. Chaichan, "Novel criteria for assessing PV/T solar energy production," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 16, pp. 100547, 2019/12/01/, 2019.
- [22] FERRAIA, « Dimensionnement des Infrastructures Utilisant Diverses Sources Énergétiques Renouvelables Potentielles pour l'Alimentation Electrique d'un Village » Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.
- [23] KARA, Abdelfattah. *Dimensionnement et analyse du coût d'un système hybride de production d'énergie renouvelable pour des sites isolés en Algérie*. Diss. 2016.
- [24] B. Rapporteur, "Thèse de Doctorat en Sciences Yahia BAKELLI Contribution à l'optimisation du dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome," 2012.
- [25] M. N. Bahadori, "Solar water pumping," *Solar Energy*, vol. 21, no. 4, pp. 307-316, 1978/01/01/, 1978.
- [26] [Pompe Volumétrique Série SVM | Gruppo Aturia - Français](#)
- [27] B. Azoui et M. Djarallah, « Dimensionnement et expérimentation d'un système photovoltaïque de pompage d'eau utilisant un moteur à aimants permanents sans balais collecteur », Journée d'Etude sur l'Energie Solaire, Mardi 01 mars 2005, Bejaia.

- [28] [Moteur à courant continu - Energie Plus Le Site \(energieplus-lesite.be\)](http://energieplus-lesite.be)
- [29] B. A. Bachir, "Dimensionnement d ' un Système de Pompage Photovoltaïque," 2017.
- [30] A.-K. Daud, and M. M. Mahmoud, "Solar powered induction motor-driven water pump operating on a desert well, simulation and field tests," Renewable Energy, vol. 30, no. 5, pp. 701-714, 2005/04/01/, 2005.
- [31] M. Académique, B. E. N. Y. Youcef, and G. Hocine, "Contrôle Vectoriel Direct d'un Moteur Asynchrone Triphasé Intégré dans un Système de Pompage Solaire," 2020.
- [32] N BAHACHE Amélioration des performances d'un système photovoltaïque par la technique d'optimisation Gray Wolf- 2022 - dspace.univ-msila.dz
- [33] Ahmed O. Bagré. « Cours sur le pompage photovoltaïque et le dimensionnement de système PV »
- [34] D. E. Master, S. Genie, and E. Et, "PHOTOVOLTAÏQUE DANS LES LOCALITES RURALES DU BENIN : CAS DE ADJAKPATA," 2017.
- [35] T. Faris and O. H. Hammou, "Thème Dimensionnement d ' un système de pompage d ' eau photovoltaïque destiné à l ' irrigation (Cas de la région de M ' sila)".
- [36] Philippe Belleudy « hydrogéologie », octobre 2004
- [37] ETUDE ET DIMENSIONNEMENT DES SYSTEMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE DANS LES LOCALITES RURALES DU BENIN : CAS DE ADJAKPATA www.2ie-edu.org
- [38] P. Claux, « Atlas solaire français », PYC éditions, 1982.
- [39] <https://acsolue-energie.fr/2021/08/05/composition-et-assemblage-dun-panneau-photovoltaique/>
- [40] B. Mohammed, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque autonome," Centre Universitaire De Bechar Mémoire de Magister, 2007-2008.
- [41] OUMNAD, "Électronique fondamentale" , École Mohammedia Des Ingénieurs, Site internet, [Http://Z.Oumnad.123.Fr](http://Z.Oumnad.123.Fr).
- [42] AFIA SEIDOU Imorou, « Etude et dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïque dans les localités rurales du Bénin : cas de adjakpata », Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur 2ie avec le grade de master, Promotion [2015/2016] Institut International d'Ingénierie. BURKINA.
- [43] A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi, « Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque ».

- [44] G.H. Hart. « Residential photovoltaic system simulation electrical aspect ». IEEE, pp. 281-288, 1982.
- [45] HAMDY Abderrazzak, « Conception et dimensionnement d'un système Photovoltaïque pour habitation et pompage », Mémoire de master 2017 – 2018, Université Mohamed Khider de Biskra.
- [46] E. Electronique, “En Electronique CONTRIBUTION A L ' OPTIMISATION D ' ENERGIE”.
- [47] Kato, K., & Koizumi, H. (2015, May). A study on effect of blocking and bypass diodes on partial shaded PV string with compensating circuit using voltage equalizer. In 2015 IEEE international symposium on circuits and systems (ISCAS) (pp. 241-244). IEEE.
- [48] Aicha Djalab. (2020). Diagnostic des défauts d'un système d'énergie renouvelable basée sur les techniques d'intelligence artificielle : application sur un système photovoltaïque, Thèse de Doctorat, Ziane Achour University of Djelfa.
- [49] Tarak Benslimane. (2020). Systèmes de conversion de l'énergie Photovoltaïque, Cour de master en Energies Renouvelables en Electrotechnique, 2021, Université de M'sila.
- [50] A. Hamidat, « Simulation des systèmes de pompage photovoltaïque destinés pour l'alimentation en eau potable et pour la petite irrigation ». Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences. Université de Tlemcen. Algérie. 2004.
- [51] A. Saadi, «Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque» Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2000.
- [52] C. Cabal, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse 15 Décembre 2008.
- [53] K. Benlarbi « Optimisation Floue, Neuronale et Neuro-Floue d'un système de Pompage Photovoltaïque Entraînées par différents machines électriques », Thème de Magister, Université de Batna 2003.
- [54] R. Algerienne, D. Et, F. D. E. Technologie, D. D. E. G. Electrique, D. E. M. En, and G. Electrique, “Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV, ” pp. 2015–2016, 2016.
- [55] J. Ferrieux, f. Forest, « alimentations a découpage convertisseurs a résonance: principes composants modélisation ». Paris, france: dunod, 1999.
- [56] M. Angel Cid Pastor, « conception et realisation de modules photovoltaïques electroniques », docteur de l'institut national des sciences appliquées de toulouse, 2006
- [57] M. Boukli-Hacene Omar « conception et réalisation d'une génération photovoltaïque muni d'un convertisseur mppt pour une meilleure gestion énergétique » magister en automatique productique informatique 2010/2011.

- [58] Dalia Al Maamoury, Muhamad Bin Mansor, Ali Assim Al Obaidi “active power control for a single-phase grid connected pv system ” , international journal of scientific & technology research vol 2, issue 3, 2013.
- [59] Akihiro Oi, “ design and simulation of photovoltaic water pumping system”, faculty of california polytechnic state university, 2005
- [60] Aamarouayache Mohamed, « contribution à l’optimisation d’une chaine de conversion d’énergie photovoltaïque », doctorat en sciences en electrotechnique option ,2014
- [61] C. L. Martin, and D. Y. Goswami. "Solar Energy Pocket Reference," <https://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=5630618>.
- [62] M. Oussama and O. Lamine, “System Pompage photovoltaïque et d ’ arrosage pastoral sur un site de la wilya D ’ EL -OUED . System Photovoltaic pumping and pastoral irrigation on a site of the wilya of EL-OUED .,” pp. 1–8.
- [63] Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller, Bocar Sada Sy « le pompage photovoltaïque, manuel de cours à l’intention des ingénieurs et techniciens » Institut de l’énergie des pays ayant en commun l’usage français, 1998
- [64] <https://www.climatsetvoyages.com/climat/algerie/el-oued>
- [65] W. D. E. L. Oued, “MONOGRAPHIE”.
- [66] <https://fr.weatherspark.com/y/53031/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-Oued-Souf-Alg%C3%A9rie-tout-au-long-de-l'ann%C3%A9e>
- [67] S. Agronomiques, “MEMOIRE DE FIN D ’ ETUDE En vue de l ’ obtention du diplôme de Master Académique en,” 2020.
- [68] U. Echahid, H. Lakhdar D’el-Oued, F. De Technologie, D. De, and G. Electricque, “REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE Ministère de l’Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique MASTER ACADEMIQUE,” 2018.
- [69] J. Macaulay and Z. Zhou, “A fuzzy logical-based variable step size P&O MPPT algorithm for photovoltaic system,” *Energies*, vol. 11, no. 6, 2018, doi: 10.3390/en11061340.
- [70] [Onduleur pour pompe à eau solaire série GD100-PV \(invt.com\)](https://www.invt.com/fr/produit/onduleur-pompe-a-eau-solaire-serie-gd100-pv)
- [71] V. Introduction, “Dimensionnement et réalisation de l ’ installation Photovoltaïque,” pp. 53–78.
- [72] <https://heylink.me/imad/>
- [73] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-une-centrale-solaire-thermique>
- [74] <https://pin.it/1Blhq7y>
- [75] F. Lasnier, T. G. Ang, « Photovoltaic Engineering Handbook », IOP Publishing Ltd. 1980.ISBN 0-85274-311-4.



ANNEXES

ANNEXE A

Photos de l'exemple appliqué

