



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Énergie renouvelable

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

Thème

Dimensionnement d'un système de Pompage Photovoltaïque

Utiliser pour l'irrigation. Etude de Cas

**Présenté par : Mr. Khalef Habib Errahmane
Mr. Sidha Ramdane**

Avis favorable de l'encadreur : M^{elle} GUERGAZI Aicha

Devant le jury composé de :

Mme. TKOUTI Nacira

.....

Président

M^{elle}. GUERGAZI Aicha

.....

Encadreur

M^{elle}. SAADI Aicha

.....

Examineur

Année universitaire : 2019 / 2020

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Machines électriques

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

Dimensionnement d'un système de Pompage Photovoltaïque

Utiliser pour l'irrigation. Etude de Cas

Présenté par : Mr. Khalef Habib Errahmane
Mr. Sidha Ramdane

Avis favorable de l'encadreur : M^{elle} GUERGAZI Aicha

Avis favorable du Président du Jury :

Cachet et signature



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Machines électriques

Thème :

Dimensionnement d'un système de Pompage Photovoltaïque Utiliser pour l'irrigation. Etude de Cas

Proposé par : M^{elle} GUERGAZI Aicha

Présenté par : Mr. Khalef Habib Errahmane
Mr. Sidha Ramdane

RESUMES

Résumé

L'eau et l'énergie sont des éléments essentiels au développement d'un pays et indispensables à la vie. La demande croissante de l'énergie et l'épuisement futur inévitable des sources d'origine fossiles exigent l'utilisation de sources renouvelables.

L'énergie solaire est abondante en Algérie et en particulier au sud où la durée d'ensoleillement dépasse les 10 heures par jour. Les régions de l'intérieur de l'Algérie souvent à vocation agropastorale, peuplées de façon éparse, ayant un climat chaud et sec en été et froid en hiver sont caractérisées par de longues périodes de sécheresses et des besoins accrus en eau pour l'alimentation en eau potable et l'agriculture.

Le but de ce travail est l'étude Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque pour l'irrigation dans des sites isolées avec un exemple de site de Biskra pour alimenter une pompe immergée d'une source d'énergie renouvelable et le Photovoltaïque à l'aide des panneaux solaire. Le projet est économiquement rentable à long terme

Mots clés: *Energie solaire photovoltaïque, Panneaux solaire, Pompage Dimensionnement.*

ملخص

المياه و الطاقة امر حيوي لتطوير البلاد و ضرورية في الحياة. الطلب المتزايد على الطاقة و مستقبل استفاد لا مفر منه من الاصل الاحفوري تتطلب استخدام مصادر الطاقة المتجددة.

الطاقة الشمسية وفيرة في الجزائر و خاصة في الجنوب حيث تجاوزت مدة سطوع الشمس 10 ساعة في اليوم. و تتميز المناطق الداخلية من الجزائر في كثير من الاحيان الزراعية الرعوية، ذات الكثافة السكانية المنخفضة، مع مناخ حار و جاف في الصيف و باردة في الشتاء فترات طويلة من الجفاف و زيادة الاحتياجات المائية للاغذية المياه الصالحة للشرب و الزراعة و الثروة الحيوانية.

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة ابعاد نظام الضخ الكهروضوئي. على وجه الخصوص، للاستهلاك الزراعي في المناطق المعزولة و ذلك بتطبيق مثال على منطقة نخيل بيسكرة من اجل تركيب مضخة مغمورة مصدر طاقة متجددة و كهروضوئي عن طريق الواح شمسية. المشروع مربح اقتصاديا على المدى الطويل، ولكن استخدام الطاقة الشمسية يحافظ على البيئة و المياه الجوفية.

الكلمات المفتاحية : طاقة شمسية كهروضوئية، ألواح شمسية، ضخ، تحجيم .

Remerciements

Ce travail a été effectué au laboratoire d'énergie renouvelable de la faculté de Génie Electrique de l'université MOHAMED KHIDER de BISKRA.

Nous remercions Dieu tout puissant que nous a donné la volonté et la patience qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

En premier lieu, nous tenons à remercier Mme **GUERGAZI AICHA** Professeur à l'université MOHAMED KHIDER de BISKRA, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour ces conseils et ses encouragements continuels.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidé de près comme de loin, pour l'élaboration de ce travail. Sans oublier les membres du jury d'avoir participé à examiner notre travail.

Nous tenons à remercier profondément tous les enseignants du Département génie électrique et laboratoire d'énergie renouvelable à l'université de BISKRA

Dédicace

Nous consacrons CE MODESTE TRAVAIL A :

Nos chers parents

Nos sœurs et nos frères

Toutes nos familles

Tous nos amis

Tous les enseignants qui nous ont aidés de proche ou de loin pour être
un jour licenciés d'électrotechnique

Khalef Habib Errahmane
Sidha Ramdane

SOMMAIRE

Dédicace	
Remerciements	
Résumé	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I: État de l'art sur le solaire photovoltaïque	
I.1. INTRODUCTION	3
I.2. LES ÉNERGIES RENOUVELABLES EN ALGÉRIE	3
I.3. LES ENERGIES RENOUVELABLES	4
I.3.1. L'énergie solaire	4
I.3.2. l'énergie hydraulique	5
I.3.3. L'énergie éolienne	5
I.3.4. L'énergie des courants marins	6
I.3.5. La biomasse	6
I.3.6. La géothermie	6
I.4. LE RAYONNEMENT SOLAIRE	6
I.4.1. Spectre du rayonnement	6
I.4.2 Durée d'insolation	6
I.4.3 Optimisation de captation du rayonnement solaire	7
I.5. LES DIFFÉRENTS TYPES DE RAYONNEMENTS SOLAIRES :	7
I.5.1. Le rayonnement diffus	8
I.5.2. Le rayonnement direct	8
I.5.3. Le rayonnement dû à L'albédo ou réfléchi	8
I.5.4. Le rayonnement global	8
I.5.4.1. Énergies solaire thermique	8
I.5.4.2. L'énergie solaire photovoltaïque	9
I.6. MODES D'UTILISATION D'UN SYSTÈME SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE	9
I.6.1. Système autonome :	10
I.6.2. Système hybride	11

I.6.3. Système raccordée au réseau	12
I.7. SYSTEMES FONCTIONNANT AU FIL DU SOLEIL (POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE)	13
I.8. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE	14
I.9. CONCLUSION	14

Chapitre II :Généralité et étude d'un système photovoltaïque

II.1. INTRODUCTION	16
II.2. HISTORIQUE	16
II.3. CELLULE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE	18
II.3.1. Description de la cellule	18
II.3.2. Structure d'une cellule PV	18
II.3.3. Différents types de cellules	19
II.3.3.1. Cellules monocristallines	19
II.3.3.2. Cellules poly cristallines	19
II.3.3.3. Cellules amorphes	19
II.3.4. Comparaison des différentes technologies	20
II.4. MODELE ELECTRIQUE D'UNE CELLULE PV	21
II.4.1. Circuit équivalent d'une cellule	21
II.4.2. Caractéristique électrique (courant-tension) d'une cellule	22
II.4.3. Détermination des différents paramètres	23
II.4.3.1. Paramètres internes	23
II.4.3.2. Paramètres externes	25
II.4.3.3. Paramètres influents sur la caractéristique courant-tension I(V)	27
II.5. ASSOCIATION DES CELLULES PV (LE MODULE PV)	30
II.5.1. Association des cellules en série	30
II.5.2. Association des cellules en parallèle	31
II.5.3. Association des cellules (série -parallèle):	32
II.5.3.1. Diode anti-retour	33
II.5.3.2. Diodes by-pass	33
II.7. CONCLUSION	34

Chapitre III: Systèmes solaires photovoltaïques de pompage

III.1. NTRODUCTION	35
III.2. LES TECHNIQUES DE POMPAGES PHOTOVOLTAÏQUE	36
III.2.1. Le pompage avec batteries	36
III.2.2. Le pompage sans batteries « au fil du soleil »	37
III.3.CONSTITUTION D'UN SYSTEME DE POMPAGE SOLAIRE	38
III.4.LES COMPOSANTS D'UN SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE	38
III.4.1. Le générateur photovoltaïque	38

III.4.2. L'électronique de commande et de contrôle	39
III.4.2.1. Le convertisseur DC/DC (Hacheur)	39
III.4.2.2. Le convertisseur DC/AC	40
III.4.3. Régulateur de charge solaire	40
III.4.4. Le groupe électropompe	41
III.4.4.2. Les pompes	41
III.4.4.2.1. Différents types des pompes	41
III.4.4.2.2. Classification selon la conception de la pompe	41
III.4.4.2.3. Classification selon la position de pompe :	43
III.4.4.2.4. Caractéristiques des pompes volumétriques et centrifuges	44
III.4.4.2.5. Classification selon les types de moteur :	44
III.4.4.3. La partie stockage	48
III.5. DIMENSIONNEMENT DE SYSTÈMES DE POMPAGE PV	48
III.5.1. Évaluation des besoins en eau	48
III.5.2. Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire	48
III.5.3. Détermination de l'énergie solaire disponible :	51
III.5.3.1. Inclinaison du générateur photovoltaïque	51
III.5.3.2. Mois de dimensionnement	51
III.5.3.3. Dimensionnement du générateur photovoltaïque	51
III.5.3.4. Dimensionnement du moteur Le moteur :	52
III.5.3.5. Dimensionnement de la pompe :	53
III.5.3.6. Dimensionnement des tuyauteries	53
III.6. CONCLUSION	54
Chapitre IV: Application d'un système de pompage PV sur le site	
IV.1. INTRODUCTION	55
IV.2. PRINCIPE DU DIMENSIONNEMENT SIMPLIFIÉ	55
IV.3. COMPOSANTS D'UN SYSTÈME DE POMPAGE PV :	55
IV.4. PRINCIPE DE DIMENSIONNEMENT PV:	56
IV.4.1. Calcul du besoin journalier théorique E_c	56
IV.4.2. La hauteur manométrique HMT :	56
IV.4.3. Le nombre des panneaux PV :	57
IV.4.4. Tension de système :	58
IV.4.5. Choix des pompes :	58
IV.4.6. Choix l'onduleur :	58
IV.5. EXEMPLE EN PRATIQUE :	59
IV.5.1. Résultats du dimensionnement :	59
IV.6. CONCLUSION	60
CONCLUSION GENERALE	61
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	63

Liste des figures

Figure I.1: Objectifs du programme algérien des énergies renouvelables	4
Figure I.2 : Image du soleil.	5
Figure I.3 : spectre solaire hors atmosphère	7
Figure I.4 : Inclinaison du panneau solaire	8
Figure I.5: Les différents types de rayonnements solaires.	8
Figure I.6 : Énergies solaire thermique	9
Figure I.7 : Champ photovoltaïque	10
Figure I.8: représentation des différents composants d'une installation PV	11
Figure I.9 : Système PV autonome.	11
Figure I.10: Système hybride	12
Figure I.11: Système PV couplés aux réseaux	13
Figure I.12 : Les éléments d'une installation de pompage photovoltaïque	14
Figure II.1: Représentation schématique d'une pile solaire à jonction PN standard.	18
Figure II.2: Différentes étapes de production d'un système photovoltaïque	21
Figure II.3: Circuit équivalent d'une cellule PV	22
Figure II.4: Caractéristiques statiques I(V), (a) I(V) d'une photodiode, (b) I(V) d'une cellule PV	23
Figure II.5 : Point de fonctionnement optimal d'une cellule PV	26
Figure II.6 : Influence des résistances, (a) série, (b) shunt sur la caractéristique I(V)	28
Figure II.7: Évolution de la caractéristique (I-V)	29
Figure II.8: Évolution de la caractéristique (I-V)	29
Figure II.9: Cellule, module, panneau, champ photovoltaïque	30
Figure II.10: Caractéristiques d'un groupement série de cellules PV	31
Figure II.11: Caractéristique d'un groupement parallèle de cellules PV	32
Figure II.12: Caractéristique d'un groupement parallèle de cellules PV	32
Figure II.13 : Exemples d'association sécurisée de deux modules PV commerciaux en	33
Figure III-1 Schéma synoptique simplifié de Pompage photovoltaïque avec stockage	36
Figure III.2: Système photovoltaïque de pompage d'eau	37
Figure III.3 : Groupement de N_s module en série et N_p en parallèle	39
Figure III.4: Conversion DC / DC	40
Figure III.5 : Conversion DC / AC.	40
Figure III.6 : Classification des pompes	41
Figure III.7: Pompes de surface	43
Figure III.8: Pompe immergée	43
Figure III.9: Moteur à courant continu. [45
Figure III.10 : Diagramme du pompage PV par motopompe à CC	45

Figure III.11: Moteur synchrone.	46
Figure III.12: Moteur asynchrone.	46
Figure III.13 : Diagramme du pompage PV par motopompe à AC	47
Figure IV. 1 Composants d'un système de pompage PV	56
Figure IV.2 La hauteur manométrique HMT	57

⋮

Liste des tableaux :

Tableau III.1. Les avantages et inconvénients des pompes au fil du soleil et	37
Tableau III.2. Classification des pompes	42
Tableau III.3. Caractéristiques des pompes volumétriques et centrifuges	44
Tableau III.4. Avantages et inconvénients pour les deux moteurs, MCC et MAS.	47
Tableau IV. 1 tension de système	58
Tableau IV. 2 Différents types de pompes	58
Tableau IV. 3: Choix l'onduleur	58

Nomenclature

- GPV : Générateur Photovoltaïque
- PV : Photovoltaïque
- MPPT: Maximum Power Point Tracking
- G : Eclairement
- P_0 : la puissance incidente
- T : Température
- I : Courant de sortie de la cellule
- I_{ph} : Courant photo-généré ou photo-courant (A)
- I_D : Courant de saturation de la diode (A)
- V_d : La tension de la diode (v)
- η : Le rendement
- V_{cos} : Tension à vide résultante d'un groupe de cellule série.
- V_{co} : Tension à vide d'une cellule.
- I_{ccp} : courant de court-circuit résultant d'un groupe de cellule parallèle
- I_{cc} : courant de court-circuit d'une cellule
- N_s : Nombre des cellules en série.
- N_p : Nombre des cellules en parallèle.
- R_p : Résistance parallèle shunt(Ω).
- R_s : Résistance série(Ω).
- DC : Courant Continu (Direct Current).
- D : diode (interpréteur non commandé)
- AC : Courant Alternatif (Alternative Current).
- $n_s I_{cc}$: Courant de court-circuit de N_s cellules en série
- V_{co} : la tension de circuit ouvert.
- E_h : énergie hydraulique (Wh/jour)
- V_a : volume d'eau (m³/jour)
- ρ_a : densité de l'eau (1000 kg/m³)
- h_s : niveau statique (m)
- Q_p : débit d'essai (m³/h)
- h_d : niveau dynamique (m)
- Q_A : débit apparent (m³/h)

f : coefficient de friction des parois de la tuyauterie
 v : vitesse moyenne du fluide (m/s)
 l : longueur de la tuyauterie (m)
 d : diamètre de la tuyauterie (m)
 K_{ac} : est un coefficient dépendant du type d'accessoire.
 P_p : Puissance de sortie sous CSM (W)
 η_g : Rendement du générateur à la température de référence (25 °C)
 A : surface active du générateur (m²)
 G_{ce} : Éclairement dans les CSM (1000 W/m²)
 η_{PV} : rendement moyen journalier du générateur dans les conditions d'exploitation
 $G_{dm}(\beta)$: irradiation moyenne journalière incidente sur le plan des modules à l'inclinaison β (kWh/m²/jour).
 B : à l'inclinaison.
 F_m : facteur de couplage
 γ : coefficient de température des cellules.
 T_c : température moyenne journalière des cellules durant les heures d'ensoleillement.
 E_h : énergie hydraulique moyenne mensuelle (kWh)
 η_{MP} : rendement du sous-système moteur-pompe.
 P_h : puissance hydraulique nécessaire (W)
 g : accélération de la pesanteur (9.81m/s²)
HMT : hauteur manométrique totale (m)
 h : hauteur totale (m)
 D : diamètre de la tuyauterie (m)
 K : coefficient qui varie de 0,75 à 1,40
 Q : débit crête de la pompe (m³/s)
 P_p : la puissance crête du générateur

Introduction Générale

L'eau et l'énergie sont des éléments importants, essentiels et indispensables à la vie. Ce sont des facteurs importants et une priorité pour le développement durable du monde et de l'Algérie. L'accès à la ressource en eau et à des énergies propres et durables constitue un des défis majeurs du 21ème siècle.

En Algérie le problème de l'eau se pose de plus en plus et avec acuité particulièrement au vu de sa position géographique, région aride et/ou semi-aride, et du réchauffement climatique des dernières décennies.

La résolution de problématique de l'eau, soit pour la consommation domestique (de personnes), soit pour l'agriculteur (élevage et irrigation), Ce problème est lié directement à un autre enjeu qui est l'apport de l'énergie nécessaire. Plusieurs régions restent non connectées au réseau public d'électricité. Il est important surtout dans les régions éloignées, désertique ou montagneuses comme le sud de l'Algérie. Parce que l'énergie requise est soit absente, soit très chère à obtenir.

Une des solutions pratique, propre et durable pour acquérir l'énergie en Algérie c'est le recours aux énergies renouvelables et en particulier l'énergie solaire au Sud. Cette source d'énergie est abondante dans notre grand désert et nous avons un des plus importants gisements solaires au monde. En effet, la durée d'insolation ou l'ensoleillement peut atteindre les 3900 heures par an au le Sahara. L'énergie acquise quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5KWh, soit près de 2263 kWh/m²/an au sud du pays.

Dans ce travail de projet de fin d'études de Master, on aborde, justement, la problématique d'approvisionnement d'eau, pour l'irrigation par pompage solaire au sud de l'Algérie et en particulier à Biskra "Université Mohamed Khider Biskra".

Vu la situation actuelle, en relation avec les mesures de confinement et de distanciation sociale imposées pour faire face à la pandémie du COVID-19, connaît un net ralentissement des activités pédagogiques et scientifiques. Nous avons changées ce chapitre, nous allons appliquer la méthode de dimensionnement de système de pompage photovoltaïque sur un exemple d'application réel, répondant à des besoins locaux dans des zones isolées ou désertiques comme Biskra.

Pour ce faire, notre travail est partagé en 04 chapitres. **Dans le premier**, on énonce l'état de l'art sur l'énergie, les notions fondamentales de l'énergie solaire et ses principes. En commençant par des notions sur le rayonnement solaire, dans deuxième temps nous montrons les différents types de systèmes photovoltaïques module et on terminera avec les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Ensuite à travers le **second chapitre**, nous décrivons le fonctionnement d'une cellule PV et ses différents types, puis nous aborderons l'association des cellules pour constituer un module PV.

La composition générale d'un système de pompage photovoltaïque, ainsi que les éléments théoriques permettant de dimensionner les stations de pompage courantes sont présentés dans le **troisième chapitre**.

A partir des modèles décrits dans le chapitre précédent, on illustre dans le dernier chapitre, le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, d'approvisionnement en eau pour l'irrigation d'un oasis de 375 de palmiers.

Et bien sûr, ce travail s'achève par une conclusion générale.

Chapitre I:

État de l'art sur le solaire

photovoltaïque

I.1. INTRODUCTION

Aujourd'hui et dans le monde entier, l'électricité est un besoin fondamental au développement économique. Son importance relative s'accroît avec les progrès techniques, l'industrialisation et le besoin de confort moderne. L'augmentation de sa production est synonyme d'amélioration de la qualité de vie et de création de richesse. Cependant, les énergies fossiles assurent actuellement la majorité de cette production, mais face à l'épuisement de ces ressources énergétiques, aux problèmes de l'environnement et à l'augmentation considérable des besoins en énergie, la recherche de nouvelles ressources énergétiques est l'une des priorités de la politique énergétique de beaucoup de pays. Les énergies renouvelables représentent une alternative écologique aux combustibles fossiles. Leur exploitation permettrait de fournir de l'électricité partout, et particulièrement aux sites isolés, et d'éviter ainsi la création de nouvelles lignes électriques [1]. Pour une meilleure compréhension de l'importance des énergies renouvelables, et particulièrement, l'énergie solaire.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommés cellules photovoltaïques). Cette énergie a prouvé plusieurs avantages; énergie propre et non-polluante, entretien minimal, aucun bruit. Mais la fabrication des panneaux photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux et le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.

I.2. LES ÉNERGIES RENOUVELABLES EN ALGÉRIE :

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie renouvelable devient de plus en plus une solution prometteuse avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre. Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout pour les applications sur des sites isolés. [2]

Dans ce propos l'Algérie l'un des pays de fort potentiel des énergies renouvelables, avec une capacité nationale d'électricité qui dépasse les 56.74 TWh avec 0.45 TWh crête seulement pour les énergies renouvelables (en 2012),spécifiquement l'énergie solaire photovoltaïque, car l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures

(hauts plateaux et Sahara), et l'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 1m^2 soit près de $3\text{KWh}/\text{m}^2$ au nord et dépasse $5,6\text{ KWh}/\text{m}^2$ au Grand Sud (TAMENRASSET) . L'Algérie s'engage donc avec une grande volonté sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions sérieuses et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile [2].

Ainsi, un programme très ambitieux est envisagé pour développer les énergies renouvelables durant la période 2015-2030, il consiste à installer une capacité totale de 22000MW , et le solaire photovoltaïque sera la principale source de production d'énergie propre car il représenterait 62% de la capacité totale projetée à 2030 [2].

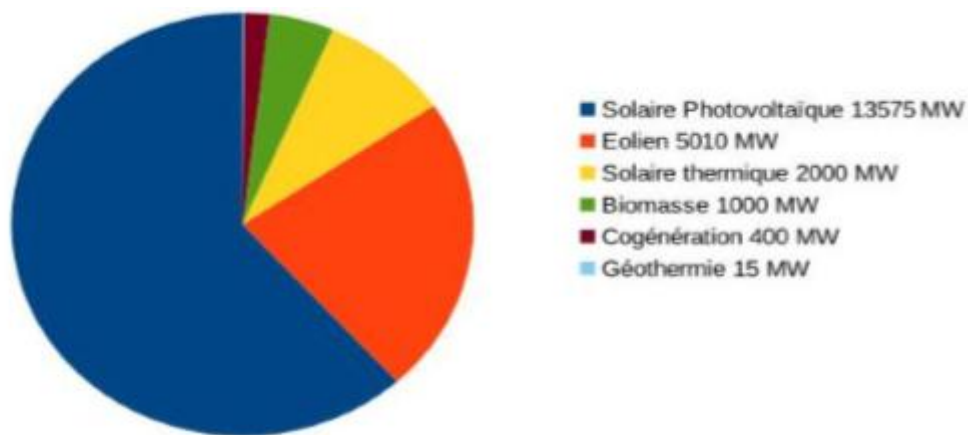


Figure I.1: Objectifs du programme algérien des énergies renouvelables [2].

I.3. LES ENERGIES RENOUVELABLES:

Les énergies renouvelables se positionnent comme une solution adéquate à l'épuisement des ressources d'énergies fossiles, et qui peut couvrir la demande mondiale de l'énergie électrique tout en préservant notre environnement. Elles sont issues des éléments naturels : le soleil, le vent, les chutes d'eau, les marées, la chaleur de la Terre, la croissance des végétaux... On les qualifie d'énergies "flux", leurs exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir. [3]

D'ici on distingue plusieurs familles des énergies renouvelables, ainsi que les différentes technologies qui sont mis en œuvre afin de les exploité convenablement.

I.3.1. L'énergie solaire : Le soleil est une étoile formé de gaz extrêmement chauds, il est constitué (par la masse), de 75% d'Hydrogène, 23% d'Hélium et 2% d'autres molécules. Les atomes d'Hydrogène sont transformés en Hélium par une réaction de fusion thermonucléaire massive. La

masse est alors transformée en énergies selon la fameuse formule d'Einstein, $E = mc^2$. Cette réaction maintient la surface du soleil à une température approximative de 5800°K.

L'énergie du soleil est transformée sous forme de rayonnement dans l'espace de manière uniforme et dans toutes les directions. Lorsqu'elle a parcouru 150 millions de kilomètres du soleil vers la terre, sa densité extraterrestre totale diminue à 1367 W/m². Cette valeur est connue sous le nom de constante solaire. En une heure, la terre reçoit suffisamment d'énergie du soleil (1,2.1017 W) pour combler ses besoins pour presque une année [4].

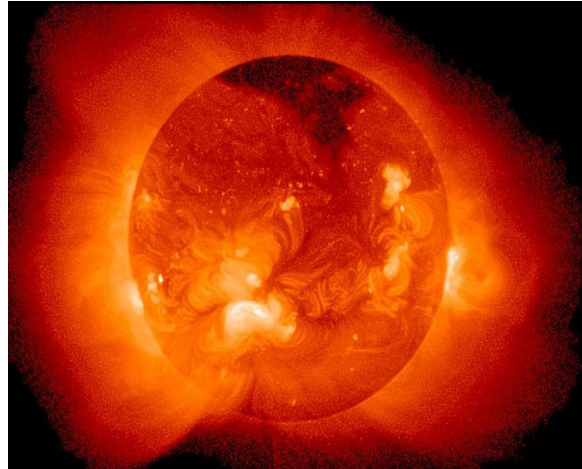


Figure I.2 : Image du soleil .

C'est l'énergie fournie par les rayons du soleil, plusieurs technologies transforment cette énergie en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement. C'est le cas des cellules photovoltaïques qui transforment la lumière du soleil directement en énergie électrique, ainsi que des collecteurs solaires qui permettent de chauffer l'eau des maisons par exemple, et les concentrateurs solaires qui utilisent des miroirs pour concentrer les rayons du soleil et générer une chaleur intense, transformant l'eau en vapeur et produisant de l'électricité grâce à certaines machines.[5]

I.3.2. L'énergie hydraulique : Cette énergie provient de la force de l'eau en mouvement. Plusieurs technologies permettent d'exploiter cette énergie, les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité.[5]

I.3.3. L'énergie éolienne : Provient de l'énergie cinétique du vent, l'aérogénérateur terme technique désignant l'éolienne, permet de la transformer en électricité. [5]

I.3.4. L'énergie des courants marins : Elle désigne l'énergie produite par les vagues et les marées, ainsi que l'énergie thermique de l'océan chauffé par les rayons du soleil. Les océans, couvrent presque 70% de la surface du globe, pourraient constituer la source d'énergie renouvelable du futur, même si, pour l'instant, leur exploitation pour produire de l'électricité n'est pas rentable. [5]

I.3.5. La biomasse : (masse des végétaux) regroupe le bois, la paille, les rafles de maïs, le biogaz et les biocarburants. Le bois issu des déchets de la forêt ou des industries du bois est brûlé pour produire de la chaleur. Il représente 14 % de la consommation énergétique mondiale.[5]

I.3.6. La géothermie: Cette énergie utilisant la chaleur du sous-sol, la géothermie peut permettre de chauffer des locaux (avec une température moyenne ou faible), ou de produire de l'électricité par vapeur interposée (avec une température élevée). [5]

I.4. LE RAYONNEMENT SOLAIRE:

L'énergie du soleil est produite par les réactions de fusion thermonucléaires (la fusion est la réunion de plusieurs noyaux atomiques légers en un seul (4 noyaux d'Hydrogène) en un noyau d'Hélium) [6].

I.4.1. Spectre du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ : Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800°K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom d'AM0. Sa distribution en énergie est répartie en [7] :

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

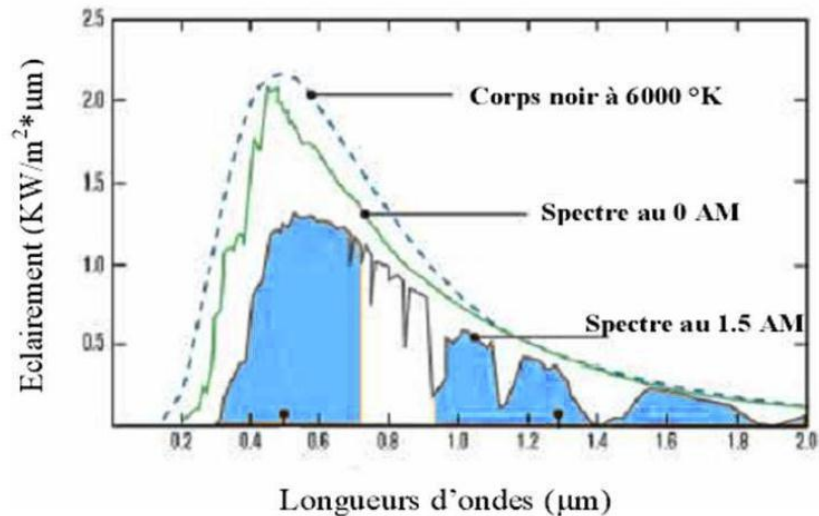


Figure I.3 : spectre solaire hors atmosphère [7].

I.4.2 Durée d'insolation

La durée d'ensoleillement ou durée de l'insolation effective est un indicateur climatique qui mesure la durée temporelle pendant laquelle un endroit, un lieu est soumis à l'insolation effective, c'est-à-dire soumis à un rayonnement solaire suffisamment intense et puissant pour produire des ombres bien distinctes. Cette indicateur est directement lié à la nébulosité, la part du ciel couvert par les nuages, du lieu ou de l'endroit en question et ne doit pas être confondu avec l'ensoleillement qui exprime la quantité d'énergie reçue par le rayonnement solaire sur une surface donnée et sur une certaine période. La durée d'ensoleillement est généralement exprimée en une moyenne d'heures par an ou alors en une moyenne d'heures par jour.

I.4.3 Optimisation de captation du rayonnement solaire

Pour augmenter le rendement d'un système photovoltaïque, en augmentant l'énergie solaire reçue, nous devons d'abord améliorer le rendement de captation par le bon choix d'inclinaison de la surface des modules photovoltaïques. Les panneaux solaires doivent être placés perpendiculairement au soleil vers le sud lorsqu'on est dans hémisphère nord, et vers le nord lorsqu'on est dans hémisphère sud. Les capteurs solaires doivent être installés au sol ou sur la toiture orientés vers le sud, à l'écart des zones ombragées. Ils doivent être inclinés avec un angle (β) afin d'obtenir un résultat optimal et par conséquent « une énergie maximale ».

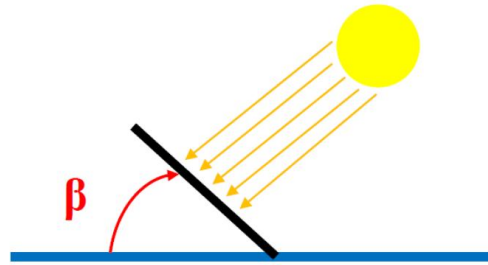


Figure I.4 : Inclinaison du panneau solaire

Le rayonnement solaire peut être décomposé en trois éléments dont la proportion est variable suivant le lieu et le moment : rayonnement direct, diffus, l'albédo et global.

I.5. LES DIFFÉRENTS TYPES DE RAYONNEMENTS SOLAIRES :

I.5.1. Le rayonnement diffus : Est constitué de la lumière diffusée par les molécules de l'atmosphère. La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions [6]. C'est lui qui nous donne la « lumière du jour » qui nous permet de voir clair même quand le temps est couvert.

I.5.2. Le rayonnement direct : Le rayonnement direct est reçu directement du soleil sans diffusion par l'atmosphère [6]. C'est lui qui nous aveugle lorsque on cherche à regarder le soleil "droit dans les yeux" par temps découvert.

I.5.3. Le rayonnement dû à L'albédo ou réfléchi: Il dépend de l'environnement du site [6], il résulte de la réflexion du rayonnement solaire direct par le sol, qui est d'autant plus important que la surface est claire et réfléchissante (neige, étendue d'eau, ...). Il peut nous faire attraper des coups de soleil à la montagne ou à la mer sans qu'on les sente venir.

I.5.4. Le rayonnement global: Le rayonnement global est la somme de ces trois types de rayonnement diffus, le rayonnement direct et l'albédo [6], comme présenté par la figure (I.4).

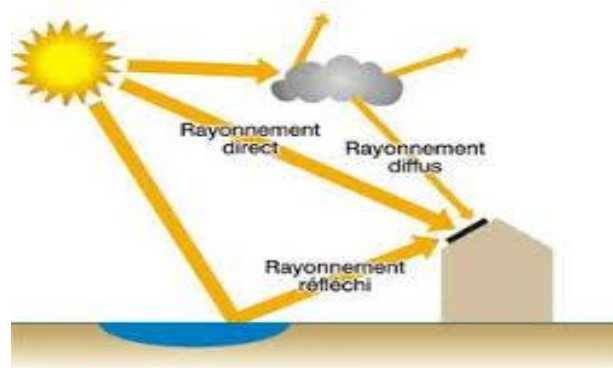


Figure I.5: Les différents types de rayonnements solaires.

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique dans lequel se trouvent notamment les rayons cosmiques, gamma, X, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes et les ondes radios en fonction de la fréquence d'émission. Tous ces types de rayonnements électromagnétiques véhiculent de l'énergie. Le niveau d'irradiante (le flux énergétique) mesuré à la surface de la Terre dépend de la longueur d'onde du rayonnement solaire.

Deux grandes familles d'utilisation de l'énergie solaire à cycle court se distinguent :

- L'énergie solaire thermique, utilisation de la chaleur transmise par rayonnement.
- L'énergie photovoltaïque, utilisation du rayonnement lui-même pour produire de l'électricité

I.5.4.1. Énergies solaire thermique :

L'énergie thermique peut être utilisée directement ou indirectement :

- Directement pour chauffer des locaux ou de l'eau sanitaire (serres, architecture bioclimatique, panneaux solaires chauffants et chauffe-eau solaire) ou des aliments (fours solaires),
 - Indirectement pour la production de vapeur d'un fluide caloporteur pour entraîner des turbines et ainsi, obtenir une énergie électrique (énergie solaire thermodynamique (ou héliodynamique)) [8].

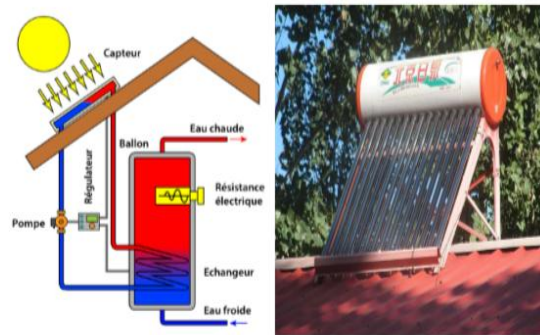


Figure I.6 : Énergies solaire thermique

I.5.4.2. L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu. Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou artificielle (une ampoule). Une installation photovoltaïque connectée à un réseau d'électricité se compose généralement de plusieurs panneaux photovoltaïques, leur nombre pouvant varier d'une dizaine à plusieurs milliers.

Il existe plusieurs technologies de modules solaires photovoltaïques :

- Les modules solaires monocristallins possèdent le meilleur rendement au m² et sont essentiellement utilisés lorsque les espaces sont restreints et pour optimiser la production d'une centrale photovoltaïque.

- Les modules solaires poly cristallins représentent une technologie proposant des rendements plus faibles que la technologie monocristalline.
 - Les modules solaires amorphes sont des panneaux solaires proposant un rendement largement inférieur aux modules solaires cristallins. Cette solution nécessite donc une plus grande surface pour la même puissance installée[8].



Figure I.7 : Champ photovoltaïque

I.6. MODES D'UTILISATION D'UN SYSTÈME SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE:

Les systèmes photovoltaïques apparaissent comme une solution privilégiée pour la production d'électricité de faible ou moyenne puissance en site isolé et particulièrement pour les habitations. Ce système PV se compose de plusieurs éléments principalement les modules PV qui représentent le champ de captage des rayons solaires ; les batteries qui constituent le champ de stockage c'est là où nous stockons de l'énergie produite par les modules ; le régulateur qui protège la batterie contre la surcharge ainsi il règle la valeur de la tension nominale ; l'onduleur qui assure la conversion du courant continu en courant alternatif dont les utilisateurs ont besoin ; le câblage qui relie les différents composants du système entre eux [9].

Généralement une installation photovoltaïque comprend les éléments suivants figure (I.7) :

- un générateur photovoltaïque.
- un convertisseur statique continu /continu (DC/DC).
- un convertisseur statique continu /alternatif (DC/AC).
- Un système de régulation et de stockage.

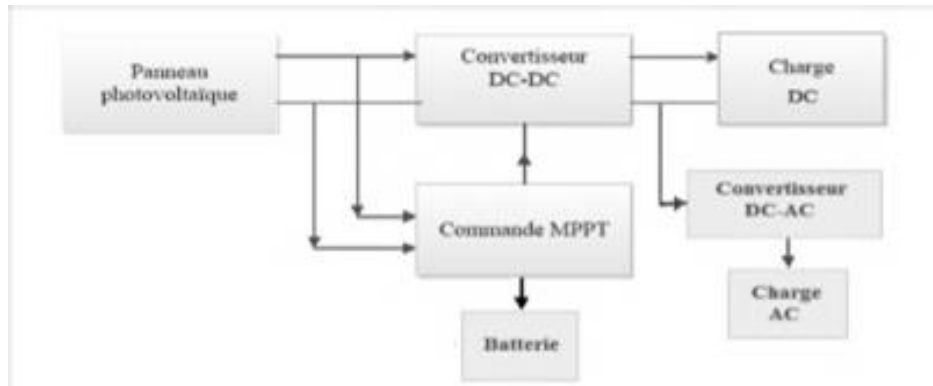


Figure I.8: représentation des différents composants d'une installation PV

Le choix du mode d'utilisation d'un système solaire se fait selon des exigences imposées que ce soit technique, économique ou géométrique. Pour cela il existe principalement trois modes à savoir : Autonome, Hybride et Raccordée au réseau

I.6.1. Système autonome :

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie, qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à de s'applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. Comme l'indique la figure (I.8), représentant un exemple de système PV autonome, la présence d'éléments de stockage est obligatoire pour assurer la fourniture à l'utilisateur continuellement et même en cas d'absence potentielle de la production d'électricité. [3]

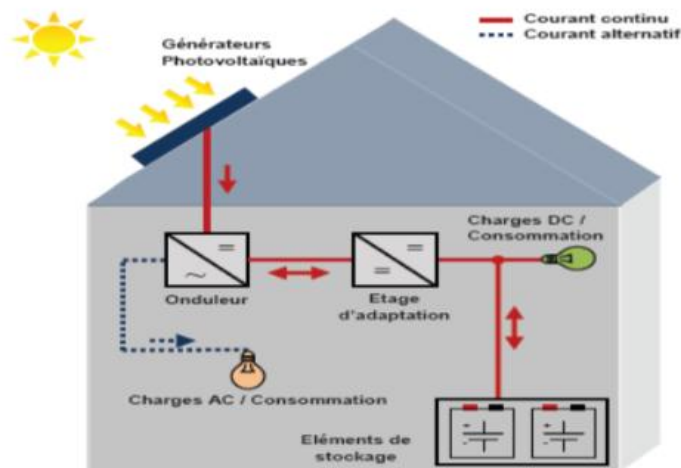


Figure I.9 : Système PV autonome.

I.6.2. Système hybride :

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée [3].

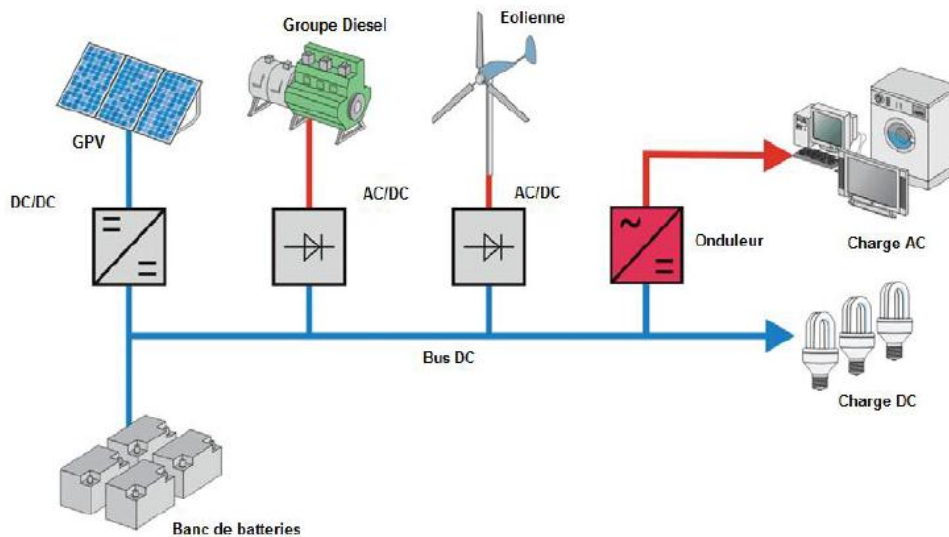


Figure I.10: Système hybride

I.6.3. Système raccordée au réseau :

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur continu/alternatif (DC/AC). Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. L'énergie produite est consommée sur place le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil [3].

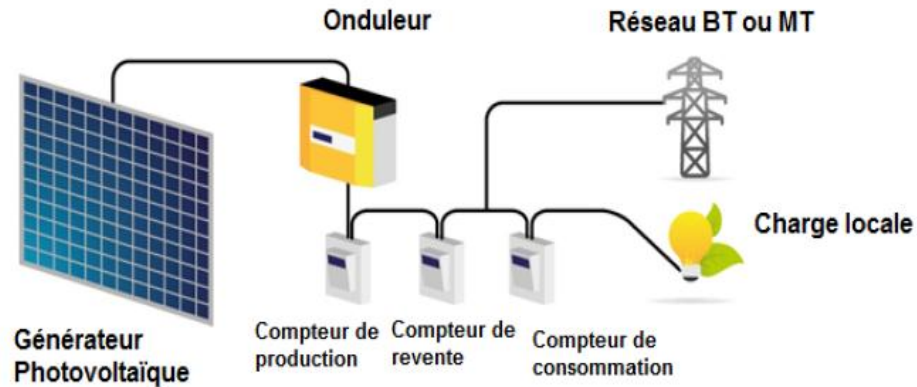


Figure I.11: Système PV couplés aux réseaux

I.7. SYSTEMES FONCTIONNANT AU FIL DU SOLEIL (POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE)

Dans les régions éloignées, désertiques ou montagneuses, l'alimentation en eau potable et d'irrigation reste toujours le souci quotidien des populations. Le pompage d'eau à l'aide de l'énergie solaire photovoltaïque est une solution bien adaptée pour ces régions. En effet, la majorité de ces régions sont très ensoleillées et cette énergie a l'avantage d'être présente et propre contrairement à l'énergie conventionnelle qui présente les contraintes de l'éloignement du réseau électrique et les contraintes du transport du combustible et les entretiens périodiques pour les moteurs diesels. Généralement, les systèmes de pompage photovoltaïque sont constitués d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur du courant électrique qui peut être un convertisseur DC/AC pour un moteur à courant alternatif ou un convertisseur DC/DC pour un moteur à courant continu et d'un groupe motopompe [10]. Ces systèmes fonctionnent au fil du soleil sans stockage électrochimique.

L'eau ainsi pompée peut être utilisée directement ou stockée dans un réservoir pour des utilisations ultérieures. Ce type de stockage de l'eau est la solution la plus adoptée par rapport au stockage électrochimique dans des batteries. Le générateur photovoltaïque est responsable de la conversion instantanée de l'énergie solaire en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque est constitué de plusieurs modules photovoltaïques reliés en série et en parallèle selon la puissance requise. La figure 1.6 présente les différents éléments constitutifs d'une installation solaire de pompage d'eau.

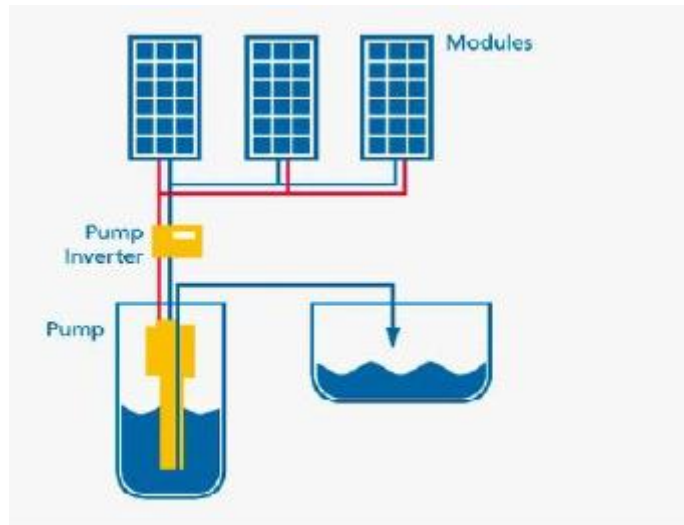


Figure I.12 : Les éléments d'une installation de pompage photovoltaïque

I.8. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE :

L'énergie photovoltaïque présente des avantages énormes tels que :

- Gratuité de cette ressource et énormité de son potentiel réparti sur le globe terrestre,
- Propreté durant son utilisation,
- Grande fiabilité.
- Peu d'entretien.
- Grande souplesse de production (variant de milliwatts aux mégawatts).
- Utilisation autonome et décentralisée. [11].

Malgré ces avantages intéressants, il y a aussi des inconvénients tels que:

- Source diffuse du rayonnement solaire qui nécessite de grandes surfaces.
- Technologie coûteuse.
- Facteur de charge faible.
- Stockage difficile.
- Difficulté à recycler les composants du système.
- Investissement élevé dépendant des décisions politiques [11].

I.9. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur les énergies renouvelables en générale et en Algérie. Nos études centrée sur l'énergie photovoltaïque, c'est l'énergie la plus intéressante elle est disponible avec un immense potentiel. Ce potentiel favorise sons utilisation pour l'alimentation électrique, en particulier les sites isolé dans les diverses régions mondiales.

Au début nous sommes intéressées à étudier l'énergie solaire et les différents types de rayonnements solaires (directe, diffus, albédo). Et nous avons évoqué des informations d'ordre général concernant l'énergie solaire photovoltaïque, et les Modes d'utilisation d'un système solaire photovoltaïque (Autonome, Hybride, raccordée au réseau), avec leurs des avantages et des inconvénients dans l'énergie photovoltaïque.

Chapitre II :

Généralité et étude d'un système photovoltaïque

II.1. INTRODUCTION :

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables la plus utilisée. Elle est transmise à la terre à travers l'espace sous forme de photons et de rayonnement électromagnétique. Elle consiste à convertir directement le rayonnement solaire en électricité. On utilise des convertisseurs photovoltaïques ou cellules photovoltaïques qui représentent l'élément de base dans la conversion photovoltaïque.[12]

La transformation du rayonnement solaire en électricité par le processus photovoltaïque est l'un des moyens d'exploitation du gisement solaire. La production de l'électricité par des moyens propres est devenue une nécessité primordiale dans un monde où l'environnement est menacé par la pollution et l'effet de serre [13]. Le photovoltaïque (PV) est une énergie propre et non épuisable. Il représente une composante essentielle des énergies renouvelables qui peut aider le monde à répondre à ses besoins énergétiques toujours croissants, tout en limitant l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre et en diminuant la pollution de l'environnement. Autrement dit, le photovoltaïque est une énergie intermittente. C'est une solution attrayante comme remplacement ou complément des sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité.

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimisant son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi que le générateur solaire photovoltaïque et leurs performances.

II.2. HISTORIQUE :

Quelques événements importants dans l'histoire du photovoltaïque :

En 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque [14].

En 1873 : l'ingénieur américain "Willoughby Smith" découvre les propriétés photosensibles du sélénium [15].

En 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire [14].

En 1877 : "W.G.Adam" et "R.E.Day" expliquent l'effet photovoltaïque du sélénium.

En 1883 : "Charles Frits" construit la première cellule en sélénium et or. Elle atteint un rendement d'environ 1% [14].

En 1905 : Einstein découvre que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique. L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante. Le domaine spatial a besoin d'une énergie sans combustible embarqué. La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque.

En 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites [14].

En 1955 : Hoffman électroniques (USA) propose des cellules Si à 2 % de rendement à \$1500/W [16].

En 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace [14].

En 1970 : Première cellule solaire à hétéro structures GaAs élaborée par Alferov, Andrée et al. En URSS [16].

En 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware [14].

En 1980 : La première cellule à base de Cu₂S/CdS délivrant un rendement > 10%.

En 1982 : Première unité de production de 1 MW (Californie, USA) avec des cellules Arco Si [15].

En 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie [14].

En 1985 : Les cellules à base de Si donnent un rendement > 20% sous le rayonnement solaire.

En 1994 : Des rendements > 30 % avec des cellules à concentration multi jonctions à base de GaInP/GaAs (NREL, USA) [16].

En 1995 : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001 [14].

En 1996 : Les cellules solaires hybrides à colorants atteignent un rendement de 11% (EPFL, Switzerland).

En 1998 : Cellules couches minces Cu(InGa)Se₂ atteignent un rendement de 19% (NREL, US).

En 2002 : Le photovoltaïque installé mondial cumulatif atteint 2000 MW 2007 Cellules solaires organiques en structure tandem avec un rendement de 6,5 % (UCSB, USA).

En 2008 : Un rendement homologué de 5,9% sur une surface active de 2 cm² obtenu par Heliatek, BASF et l'Institut de photovoltaïque appliquée (IAPP) de l'Université technique de Dresde (Allemagne) [16].

II.3. CELLULE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE:

II.3.1. Description de la cellule :

Une cellule PV (photopile) est l'élément fondamental de la conversion photovoltaïque. En effet, cette cellule qui est exposée à la lumière (photons), transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. La tension obtenue est fonction de la lumière incidente. La photopile délivre une tension variable entre 0V et 0.7V, elle dépend des propriétés des matériaux utilisés et de la température. Nous allons ici présenter la structure et le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

II.3.2. Structure d'une cellule PV :

La structure de base d'une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée *P* (dopée au bore) et l'autre dopée *N* (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face de la zone P du cristal et joue le rôle d'anode [13]. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN. Ainsi, les atomes se trouvent bombardés par les photons constituant la lumière (Figure II.1), et sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches de valence ont tendance à être arrachés/décrochés de leur orbites. Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positive et négative de la cellule, à travers une charge.

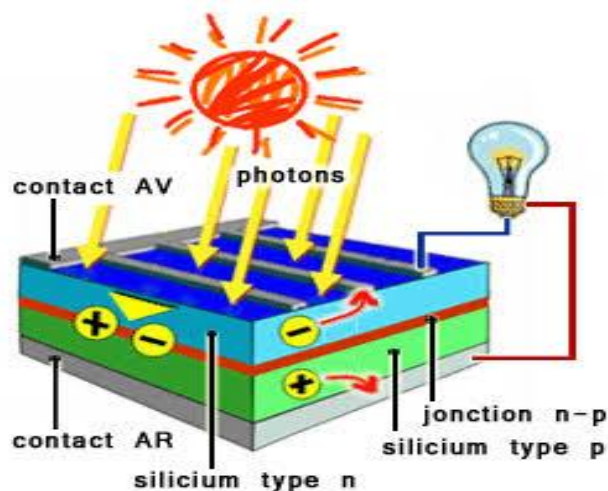


Figure II.1: Représentation schématique d'une pile solaire à jonction PN standard.

Alors, une cellule photovoltaïque est par définition un générateur électrique élémentaire. Qui convertie directement la lumière en électricité.

II.3.3. Différents types de cellules

Différentes technologies des cellules solaires sont actuellement appliquées en cours de développement, plus de 90% de la production des cellules solaires annuelle est faite à partir du silicium cristallin [17]. Selon leur matériau de base, les cellules peuvent être divisées en trois groupes:

- Cellules au silicium monocristallin
- Cellules au silicium poly cristallines
- Cellules au silicium amorphe

II.3.3.1. Cellules monocristallines

Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (15-22%) mais aussi celles qui ont le coût le plus élevé du fait d'une fabrication compliquée [18].

II.3.3.2. Cellules poly cristallines

Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, ce pendant leur rendement est plus faible (13-20%) [18].

II.3.3.3. Cellules amorphes

Elles ont un faible rendement (5%) [17] mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans les produits de petites consommations telles que les calculatrices solaires.

On remarque que quel que soit le matériau utilisé, le rendement de la conversion PV peut aller jusqu'au 40% [17]. Ces faibles rendements liés à la technologie des matériaux, constituent le premier problème majeur de l'exploitation de l'énergie solaire. Grâce à la technologie des nouveaux matériaux de tellure de cadmium (CdTe), arséniure de galium (GaAs) ainsi que le di séléniure de cuivre et d'indium (CIS), des photopiles ayant des rendements 40% au laboratoire ont pu voir le jour [13].

II.3.4. Comparaison des différentes technologies :

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium mono Cristallin	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> - Très performant - Stabilité de production du W - Méthode de production coûteuse et laborieuse. 	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium poly Cristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> - Adapté à la production à grande échelle. - Stabilité de production du W. Plus de 50% du marché mondial 	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	5 à 8% (13% en laboratoire)		<ul style="list-style-type: none"> - Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. - Fonctionnement si faible luminosité. - Fonctionnement par temps couvert. - Fonctionnement si ombrage partiel - La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois 	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
Composite mono cristallin (GaAs)	18 à 20% (27.5% en laboratoire)		<ul style="list-style-type: none"> - Lourd, fissure facilement 	Systèmes de concentrateurs Aérospatiaux (satellites)
Composite poly cristallin (CdS, CdTe, CuInGaSe ₂ , etc.)	8% (16% en laboratoire)		<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes 	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

Quel que soit le type des cellules, les panneaux photovoltaïques sont fabriqués en respectant le procédé présenté par la (Figure II.2). En effet, un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules en série et/ou en parallèles. Il faut ajouter aussi des diodes de protection (série pour éviter les courants inverses et dans le cas de déséquilibre elles sont mises en parallèle) pour passer d'un module à un panneau [7].



Figure II.2: Différentes étapes de production d'un système photovoltaïque.

II.4. MODELE ELECTRIQUE D'UNE CELLULE PV

II.4.1. Circuit équivalent d'une cellule

La modélisation du comportement d'une cellule PV fait appel aux propriétés du rayonnement solaire et celles des semi-conducteurs. Dans la littérature, il existe plusieurs modèles mathématiques d'une cellule photovoltaïque dont le but est l'obtention de la caractéristique courant-tension (I-V) pour l'analyse et l'évaluation des performances des modules photovoltaïques. Ces modèles diffèrent entre eux par la structure choisie du panneau PV et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la paire courant-tension. Le modèle à une diode est le plus classique et le modèle le plus couramment utilisé. Il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation

du flux lumineux incident et une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série et shunt R_s et R_{sh} respectivement. La résistance série est due à la contribution des résistances de base, du front de la jonction et des contacts faces avant et arrière. La résistance shunt caractérise les courants de fuite de la jonction au long de la périphérie de la cellule : elle est réduite à la suite de la pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si elle est profonde), lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule [18].

La

(Figure II.3)représente le schéma équivalent électrique d'une cellule. Cette figure montre que le courant généré par une cellule est égal à la somme de trois courants.

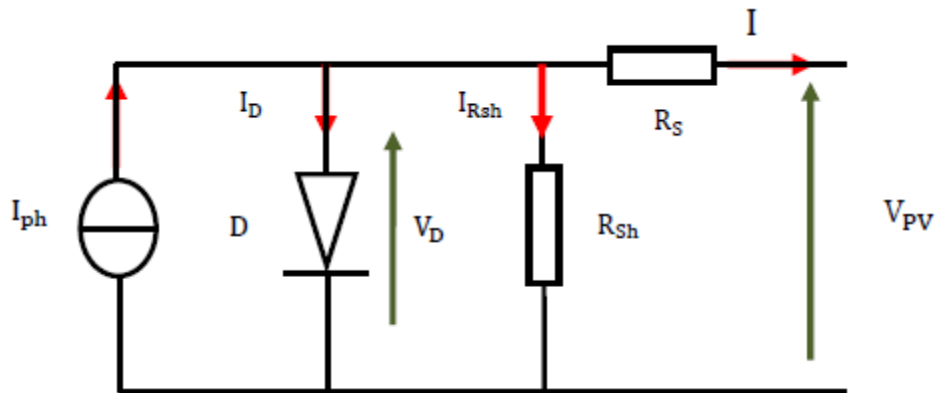


Figure II.3: Circuit équivalent d'une cellule PV [18].

II.4.2. Caractéristique électrique (courant-tension) d'une cellule

Comme le montre dans la (Figure II.3), la caractéristique statique d'une cellule est celle d'une photodiode mais en convention générateur. La courbe de la cellule solaire $I(V)$ passe par trois points importants:

- Le courant de court-circuit I_{cc} ;
- La tension de circuit ouvert V_{co} ;
- Le point M qui caractérise le point de puissance maximale.

La caractéristique $I(V)$ d'une cellule PV se divise en trois parties [19]:

- Zone (a), où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement G ;
- Zone (b), où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{co} ;
- Zone (c), où l'impédance interne du générateur varie rapidement

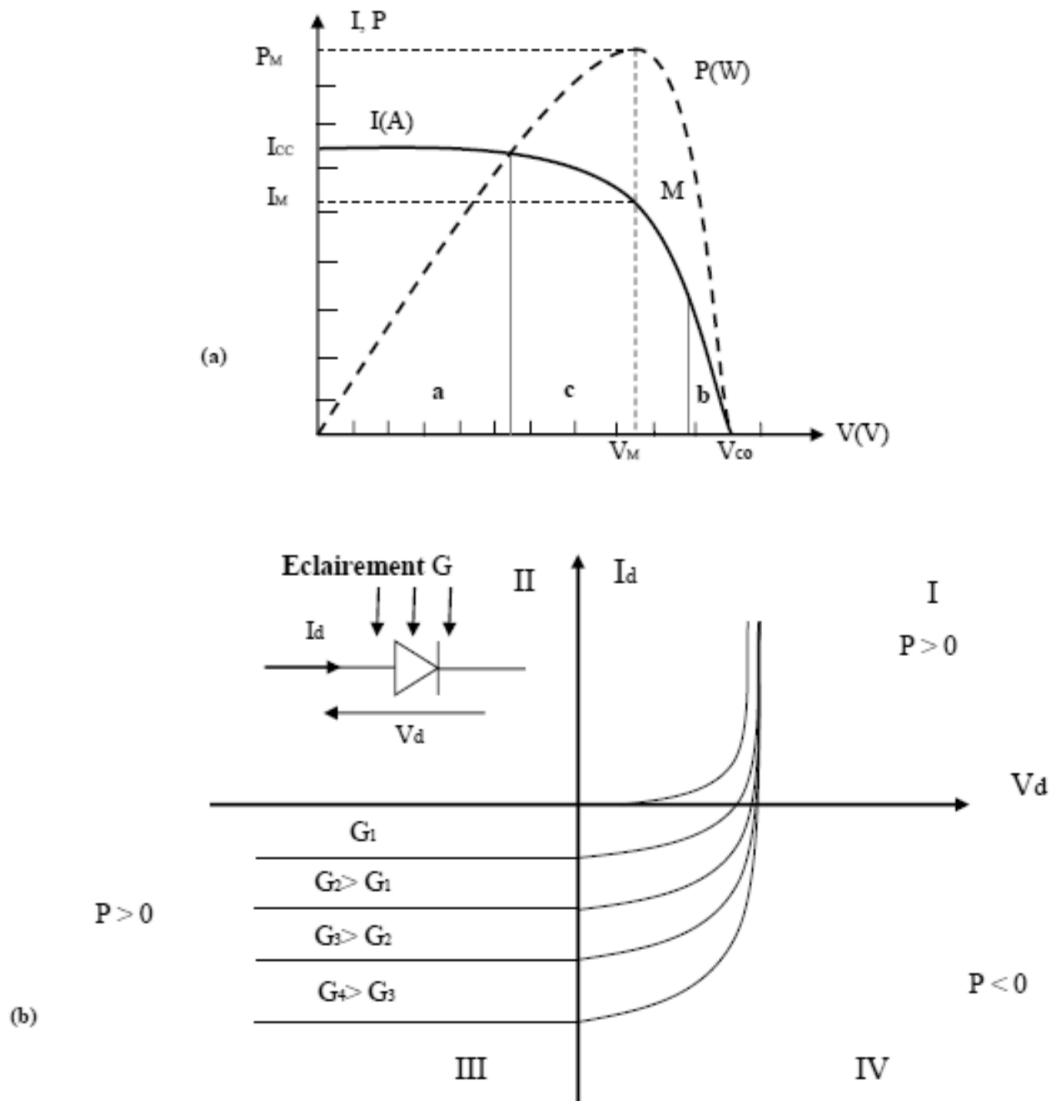


Figure II.4 : Caractéristiques statiques I(V),
(a) I(V) d'une photodiode, (b) I(V) d'une cellule PV [20].

II.4.3. Détermination des différents paramètres

Une cellule est caractérisée par différents paramètres qui nous aident à tracer les caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule PV. Ces paramètres peuvent être interne ou externe.

II.4.3.1. Paramètres internes

Ce sont des paramètres tirés à partir des équations qui nous permettent d'obtenir la caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque. Lorsqu'on relie les côtés du circuit à un echarge R , un courant I qui parcourt le circuit produit l'apparition d'une différence de potentiel.

La loi de Kirchhoff nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \quad (\text{II.1})$$

Où :

I est le courant fourni par la cellule ;

I_{ph} est le photo-courant, proportionnel à l'éclairement G , il correspond également au courant de court-circuit I_{cc} défini comme suit :

$$I_{ph} = I_{cc} \left(\frac{G}{1000} \right) \quad (\text{II.2})$$

I_D représente le courant de polarisation d'une diode, il est donné par :

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{V+R_s I}{V_T}} - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

Avec :

I_s : est le courant dépendant de la température T et des paramètres électriques technologiques de la jonction.

V_T : est le potentiel thermodynamique définit par :

$$V_T = \frac{AKT}{q} \quad (\text{II.4})$$

T : est la température effective de la cellule en Kelvin

I_{Rsh} est le courant parcourant la résistance R_{sh} . Il est donné par:

$$I_{Rsh} = \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.5})$$

A partir de la relation (I.1), on obtient l'expression de la caractéristique $I(V)$ du modèle choisi :

$$I = I_{cc} \left(\frac{G}{1000} \right) - I_s \left(e^{\frac{V+R_s I}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.6})$$

II.4.3.2. Paramètres externes

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes I(V), ou de l'équation caractéristique (II.6). Les plus usuels sont les suivants :

A. Courant de court-circuit I_{cc}

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, et de la température. Ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} . En annulant la tension V dans l'équation (I.6), on obtient [19,21].

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V+R_s I}{V_T}} - 1 \right) - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \quad (\text{II.7})$$

Pour les photopiles dont la résistance série est faible, on peut négliger le terme $I_s \left(e^{\frac{V+R_s I}{V_T}} - 1 \right)$ devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit devient alors :

$$I_{cc} = \frac{1}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} I_{ph} \quad (\text{II.8})$$

B. Tension du circuit ouvert V_{co}

C'est la tension de circuit ouvert dans lequel le courant débité par la cellule est nul (c'est la tension maximale d'une photopile). Elle dépend de la barrière de potentiel et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie légèrement avec l'intensité lumineuse. Elle s'exprime analytiquement selon la formule suivante [18] :

$$V_{co} = V_T * \ln \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \quad (\text{II.9})$$

Si la résistance série est nulle et la résistance shunt est infinie, l'expression (I.9) devient :

$$V_{co} = V_T * \ln \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{II.10})$$

Il est annoté que pour une photopile en silicium, la tension de V_{co} est de l'ordre de 0.55 à 0.6.

C. Puissance optimale et le facteur de forme [19,21].

La puissance utile maximale $P_M = V_M I_M$ s'obtient en optimisant le produit courant tension.

$$\frac{I_M}{V_M} = - \left(\frac{dI}{dV} \right)_M \quad (\text{II.11})$$

Quant au facteur de forme FF (dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage, ou (*fill factor*)), il est défini par:

$$FF = \frac{V_M I_M}{V_{co} I_{cc}} \quad (\text{II.12})$$

Ce facteur montre la déviation de la courbe I(V) par rapport à un rectangle (de longueur V_{co} et largeur I_{cc}) qui correspond à la photopile idéale. Les valeurs de I_M et V_M s'obtiennent à partir des équations (I.7) et (I.11). Pour cela, on distingue deux cas :

- Si R_{sh} est infinie, la dérivation mène à la r
- Solution d'une équation non linéaire en I_M par une méthode numérique, et permet donc le calcul de V_M ;
- Si R_{sh} est considérée finie, la dérivation mène à la résolution d'une équation non linéaire en V_M par une méthode numérique

D. Rendement

La puissance $P = IV$ est nulle en court-circuit et en circuit ouvert. Elle passe par un maximum quand on parcourt la caractéristique I(V). Ce maximum P_M peut être déterminé en portant sur le même graphique la caractéristique I(V) et les hyperboles de puissance constante.

Le point de fonctionnement optimal correspond au point de tangence des deux courbes comme le montre dans la (Figure II.5)

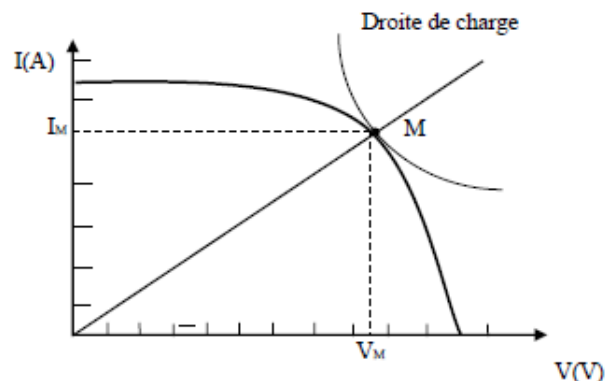


Figure II.5 : Point de fonctionnement optimal d'une cellule PV[19]

Le rendement de la photopile est donné par:

$$\eta = \frac{P_M}{P_0} \quad (\text{II.13})$$

P_0 est la puissance incidente. Elle est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Pour le silicium, le rendement est inférieur à 14 %. La droite passant par l'origine et par le point de puissance maximale a une pente qui correspond à la charge optimale de la photopile comme le montre dans la (Figure II.4)[13, 19, 21].

II.4.3.3. Paramètres influents sur la caractéristique courant-tension I(V)

Quatre paramètres influent sur le comportement électrique d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque :

- Résistance série R_s ,
- Résistance shunt R_{sh} ,
- Eclairement G ,
- Température T .

1. Influence des résistances série et shunt

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible [19, 21]. La (Figure II.6-a) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique I(V) de la cellule. La courbe en pointillés correspond à une valeur non nulle de R_s . Cette influence est traduite par une diminution de la Droite de charge pente de la courbe dans la zone où la cellule fonctionne comme une source de tension. La chute de tension correspondante est liée à la résistance interne de la cellule.

Dans le cas d'une résistance shunt, qui est liée directement au processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs du courant. La (Figure I.6-b) montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspondante à un fonctionnement comme source de courant. Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée. La résistance shunt est en général très élevée, si elle diminue, on remarque une légère pente au voisinage du point du courant de court-circuit sur la caractéristique I(V) (Figure II.4). Une résistance shunt trop faible aura un impact sur la tension de

circuit-ouvert de la cellule : une cellule photovoltaïque dont la résistance shunt est trop faible ne donnera plus de tension sous un faible éclairement.

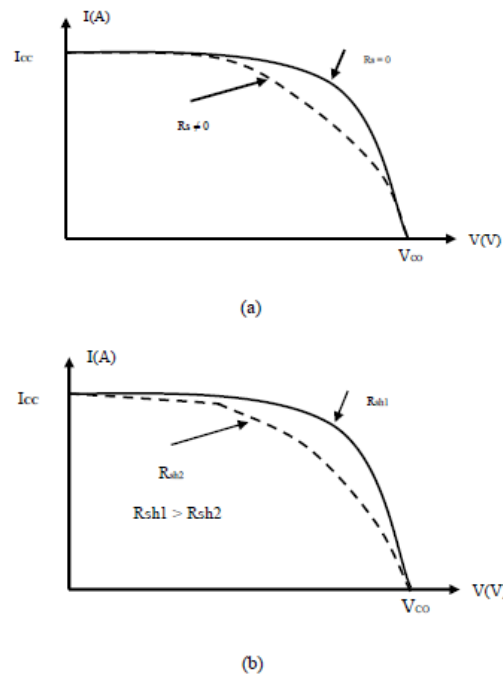


Figure II.6 : Influence des résistances, (a) série, (b) shunt sur la caractéristique $I(V)$ [22]

- Influence d'éclairement :

Le photo-courant I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement ou aux flux lumineux G . Le courant I_d (V_d), étant par définition le courant direct de la jonction sous obscurité, est normalement non modifié. Ceci n'est valable que pour des cellules n'utilisant pas la concentration du rayonnement solaire ou travaillant sous une faible concentration. En effet, la densité des porteurs de charge et le courant de saturation sont modifiés par la variation de la température et de la concentration de l'éclairement. Le photo-courant créé dans une cellule photovoltaïque est aussi proportionnel à la surface S de la jonction soumise au rayonnement solaire. Par contre la tension de circuit ouvert n'est dépend pas et n'est fonction que de la qualité du matériau et du type de jonction considérée. La (Figure II.7), représente les caractéristiques $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque (jonction PN sur du silicium monocristallin de 57 mm de diamètre) à 250C et sous diverses valeurs de l'éclairement G . A chacune de ces valeurs du flux lumineux correspond une puissance électrique maximale que pourrait fournir la cellule solaire. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert V_{co} suite à une chute du flux lumineux [21].

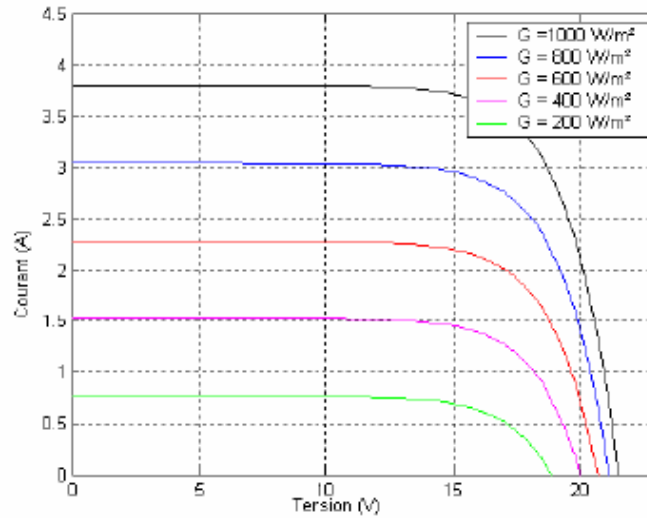


Figure II.7: Évolution de la caractéristique (I-V)

- Influence de la température :

La température est un paramètre très important dans le comportement des photopiles. En effet, si la température augmente, le photo-courant augmente environ de $3 \cdot 10^{-2} \text{mA}^\circ\text{K}^{-1}$ par cm^2 de cellule. Par contre, le courant I augmente très rapidement avec T . Il s'engendre une diminution de la tension du circuit ouvert V_{co} . Cette diminution est de l'ordre de $2 \text{mV}^\circ\text{K}^{-1}$ comme le montre la (Figure II.8). L'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible, de l'ordre de $5 \cdot 10^{-5} \text{W}^\circ\text{K}^{-1}$ par cm^2 de cellule, soit une variation de 0,35% par degré.

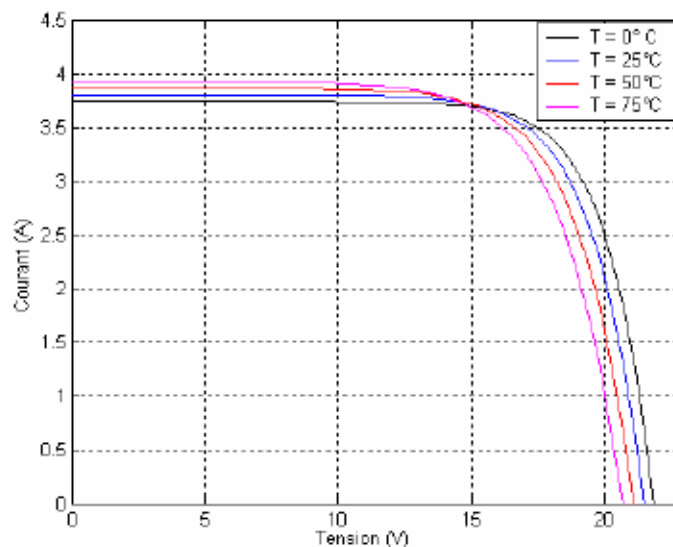


Figure II.8: Évolution de la caractéristique (I-V)

II.5. Association des cellules PV (le module PV)

La cellule solaire, de forme ronde ou carrée est l'élément de base d'un système solaire. Un ensemble de cellules forme un module solaire, dans un module les cellules sont reliées électriquement entre elles et encapsulées, donc protégées des agents extérieurs. Plusieurs modules forment un panneau solaire. Plusieurs panneaux forment un système ou champ solaire, auxquels viennent s'ajouter des protections, un régulateur, un système de stockage de l'énergie (batterie) des appareils de contrôle et de mesure [22].

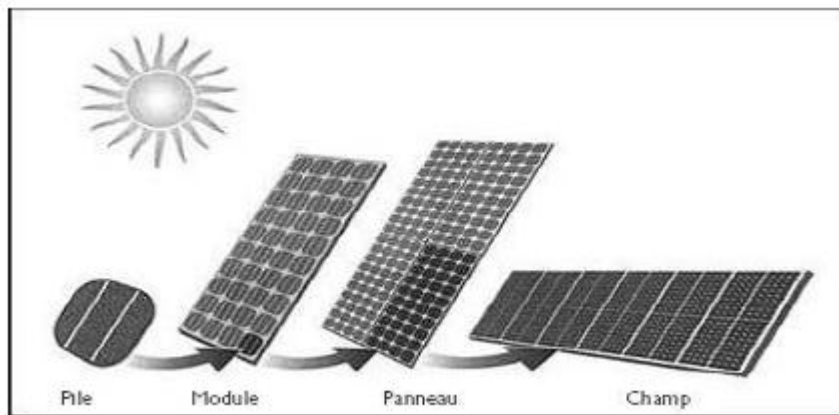


Figure II.9: Cellule, module, panneau, champ photovoltaïque

Le terme générateur photovoltaïque GPV est utilisé pour désigner, selon l'application considérée, un module ou un panneau PV. Toutefois, il peut faire allusion au système PV tout entier. La forme générale de la caractéristique $I(V)$ d'un module solaire ou photovoltaïque est identique à celle d'une cellule solaire élémentaire.

II.5.1. Association des cellules en série

Une association de (N_s) cellules en série permet d'augmenter la tension du GPV. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule

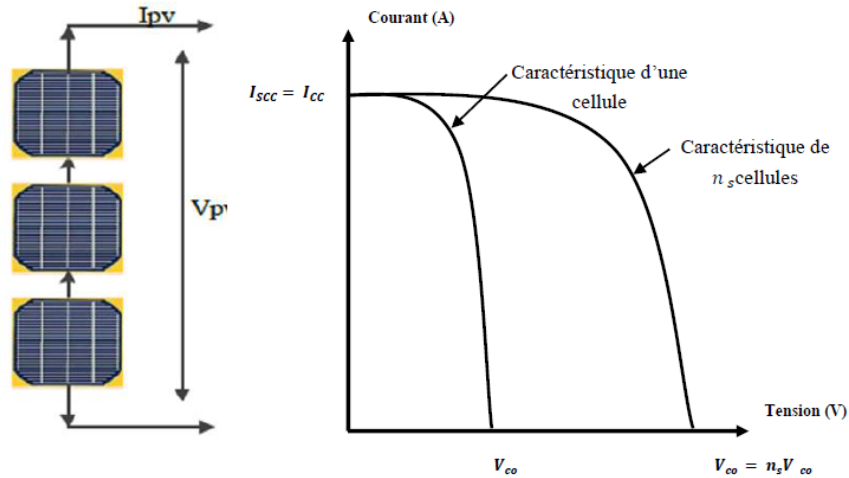


Figure II.10: Caractéristiques d'un groupement série de cellules PV

Cette figure (II.10) montre que pour n_s cellules en série, la tension V_{co} du groupement augmente d'un taux de [23] :

$$V_{co} = n_s V_{co} \quad (\text{II.14})$$

$$I_{cc} = n_s I_{cc} \quad (\text{II.15})$$

$n_s I_{cc}$: Courant de court-circuit de N_s cellules en série ;

V_{co} : la tension de circuit ouvert.

II.5.2. Association des cellules en parallèle

En additionnant des cellules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de cellules en parallèle dans la branche. La caractéristique résultante est illustrée dans la (Figure II.11) [24].

Cette figure montre que pour n_p cellules en parallèle, le courant I_{cc} du groupement augmente d'un taux de [23]:

$$I_{pcc} = n_p I_{cc} \quad (\text{II.16})$$

$$V_{co} = n_p V_{co} \quad (\text{II.17})$$

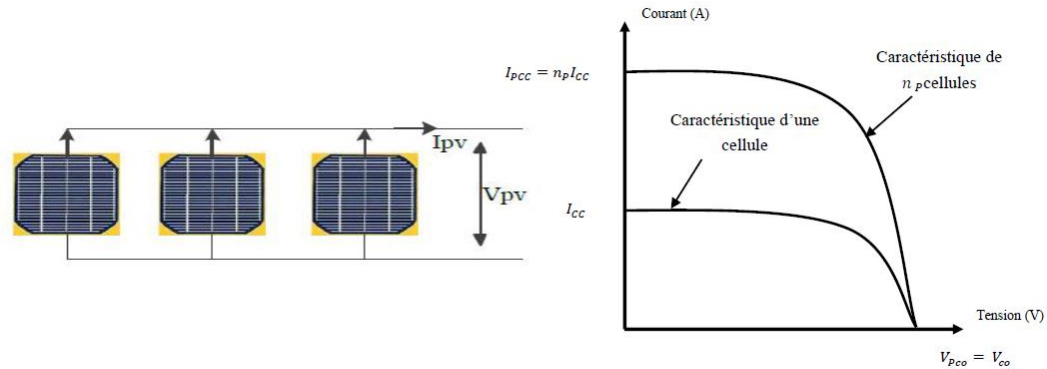


Figure II.11: Caractéristique d'un groupement parallèle de cellules PV

II.5.3. Association des cellules (série-parallèle):

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous (Figure II.12), ce qui peut être généralisé sur une gamme de N_s modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un GPV [25].

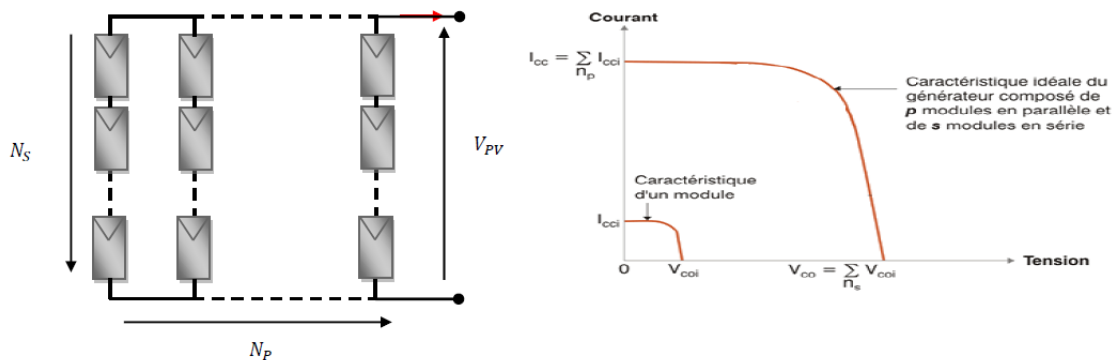


Figure II.12: Caractéristique d'un groupement parallèle de cellules PV

La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallin connectés en série, comme l'illustre la figure suivante. Chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules connectées en série. Le nombre de cellules

de chaque sous-réseau correspond à un compromis économique entre protection et perte d'une partie importante du GPV en cas de défaut partiel d'ombrage

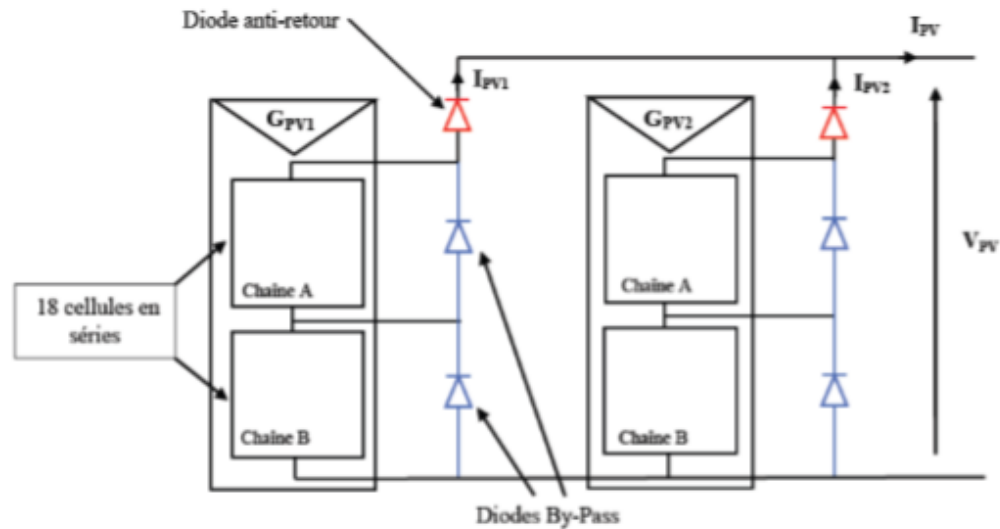


Figure II.13 : Exemples d'association sécurisée de deux modules PV commerciaux en parallèle avec leurs diodes de protections.

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et de panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles:

II.5.3.1. Diode anti-retour: Empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit

II.5.3.2. diodes by-pass: peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, comme illustré sur la figure 1.13, par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance [26].

A l'arrière de chaque module se trouve une **boite de jonction** contenant 2 diodes antiparallèles. Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre [26].

II.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons détaillé le principe de la cellule et la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes technologies utilisées afin de mieux comprendre l'ensemble du mécanisme de conversion. Les systèmes photovoltaïques permettent d'exploiter l'énergie du soleil à diverses fins. Ils sont très fiables, silencieux et rentables dans les régions éloignées.

Ces systèmes peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre aux besoins en matière d'électricité et constituent une source non polluante qui peut convenir à toute une gamme d'applications telle que le pompage solaire qui est utilisé efficacement dans le monde entier afin de pomper de l'eau pour le bétail, les plantes ou les êtres humains.

Chapitre III :

Systemes solaires

photovoltaïques de pompage

III.1. INTRODUCTION :

Dans nos jours, la demande d'eau est plus en plus importante. Le problème se multiplie en particulier dans les zones rurales et les sites isolés où l'accès à l'énergie classique est difficile. En effet, la majorité de ces régions sont très ensoleillées et cette énergie a l'avantage d'être présente et propre contrairement à l'énergie conventionnelle qui présente les contraintes de l'éloignement du réseau électrique et les contraintes du transport du combustible et les entretiens périodiques pour les moteurs diesels. Ce phénomène a fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des générateurs photovoltaïques comme nouvelle source d'énergie.

Plusieurs recherches ont traitées ce sujet, tels que le pompage d'eau d'irrigation par l'énergie solaire, dimensionnement et optimisation technico-économique d'un système d'énergie solaire photovoltaïque avec système de stockage (batteries), D'autres travaux sur le dimensionnement de systèmes de pompage photovoltaïque (PV) ont été publiés [27].

Un système de pompage solaire fournit aux personnes, aux animaux et aux terres agricoles une qualité d'eau dépendant du forage ou de la source utilisée. Un système de pompage solaire au fil du soleil doit être dimensionné en fonction du débit souhaité et de la profondeur du forage. Bien entendu, la localisation du projet a un impact considérable sur la taille du champ photovoltaïque.

Les systèmes de pompage solaire au fil du soleil possèdent un champ d'application spécifique qui ne convient pas à toutes les situations et à toutes les applications. Les caractéristiques de l'énergie solaire sont d'être périodique (jour/nuit) et continuellement variable en fonction de l'ensoleillement au cours d'une journée.

Souvent, le pompage au fil du soleil n'est pas adapté à la demande des usagers. Alors que l'énergie solaire est plus intense au milieu de la journée, les besoins en eau ne sont pas très élevés en cette période. Ainsi, la courbe de débit de l'eau pompée par l'énergie solaire ne coïncide pas avec celle de la demande en eau. Pour cette raison, il peut être nécessaire de stocker l'eau dans un réservoir, de telle sorte qu'elle puisse y être extraite au besoin. Son dimensionnement devra prendre en compte le fait qu'une partie de l'eau requise chaque jour devra être stockée durant la journée, au fur et à mesure que la pompe extrait l'eau.

Dans ce chapitre on traite plus particulièrement les éléments nécessaires qui consistent une station de pompage solaire.

III.2. LES TECHNIQUES DE POMPAGES PHOTOVOLTAÏQUE

Pour pomper l'eau avec un système photovoltaïque, deux méthodes sont possibles :

La première méthode consiste à utiliser un stockage de l'énergie via des batteries. L'énergie stockée durant la journée peut être utilisée plus tard pour pomper l'eau. Dans la deuxième technique, l'énergie solaire est consommée en temps réel, on parle alors d'un «pompage au fil du soleil». Cette solution nécessite, cette fois-ci, un stockage de l'eau dans un réservoir (l'eau pompée pendant la journée est stockée afin d'être utilisée plus tard, exemple le soir) [28].

III.2.1. Le pompage avec batteries

Ce système utilise des batteries pour stocker l'électricité produite par les modules, il permet de s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la motopompe. L'inconvénient majeur de cette technique est qu'elle comporte plusieurs composants qui influent négativement sur la fiabilité et le coût global du système. Les batteries sont fragiles et sont souvent les premiers éléments qui auront besoin d'être changés. Elles nécessitent un entretien constant et un contrôle rigoureux de leur charge et décharge. Les contrôleurs utilisés pour régulariser la charge et la décharge des batteries vieillissent rapidement et peuvent s'avérer non fiables. Les batteries introduisent également un certain degré de perte de rendement d'environ 20% à 30% de la production d'énergie.

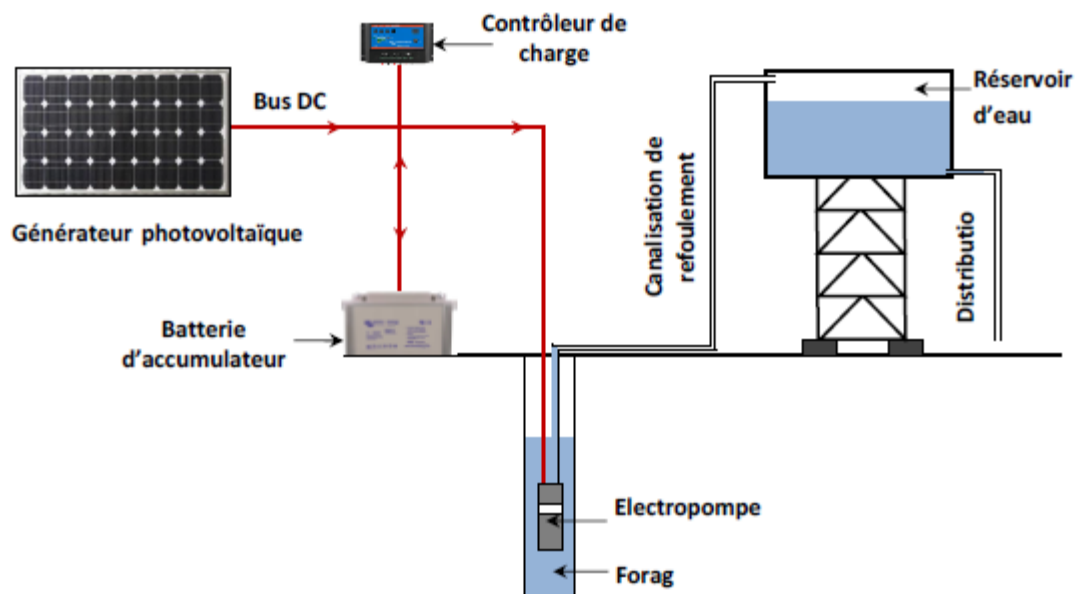


Figure III-1 Schéma synoptique simplifié de Pompage photovoltaïque avec stockage

III.2.2. Le pompage sans batteries « au fil du soleil »

Le pompage sans batterie, appelé «pompage au fil du soleil », utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation. Il permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple et plus fiable et moins coûteux qu'un système avec batteries. Le stockage se fait d'une manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. En suite elle est distribuée par gravité au besoin.

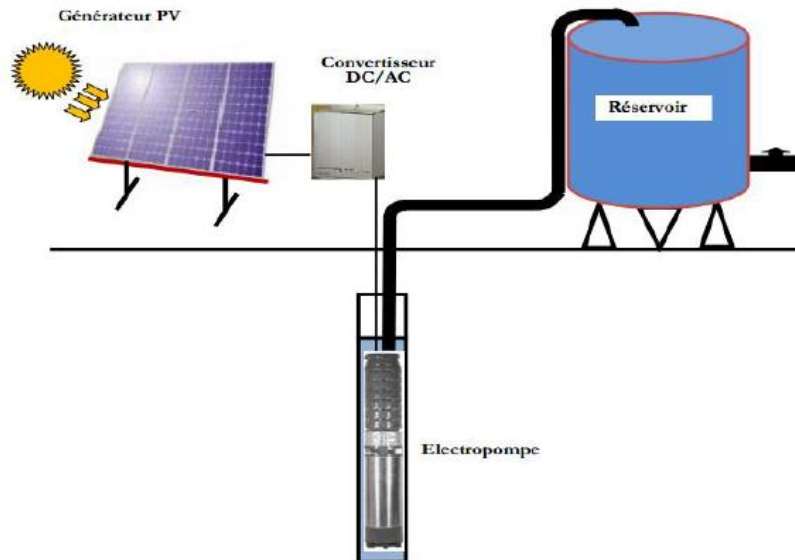


Figure III.2: Système photovoltaïque de pompage d'eau

Les avantages et inconvénients des deux techniques de pompage photovoltaïque sont résumés dans le tableau III.1.

Tableau III.1. Les avantages et inconvénients des pompes au fil du soleil et avec batteries [29].

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

	- Possibilité de pomper l'eau lorsque le soleil est absent.	- Changement des batteries tous les 5 à 7 ans - Les batteries introduisent un certain degré de perte de rendement d'environ 20% à 30% de la production d'énergie. - Coût élevé du système photovoltaïque.
--	---	---

III.3.CONSTITUTION D'UN SYSTEME DE POMPAGE SOLAIRE

Les performances d'un système de pompage solaire de l'eau dépendent des caractéristiques du site (ensoleillement, température, situation géographiques, ...), et des caractéristiques des équipements (rendement, durée de vie, ...).

Le système de pompage photovoltaïque est constitué de:

- Des panneaux solaires photovoltaïques qui convertissent les rayonnements solaires en énergie électrique, interconnectés électriquement pour constituer une unité de production de courant continu.
- Une unité de commande et contrôle de puissance, constituée d'un régulateur de charge, d'une batterie et un convertisseur(onduleur), capable d'assurer des tensions à amplitudes et fréquences réglables en fonction de la puissance disponible du générateur solaire.
- Un groupe électropompe immergé, constitué d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge.
- Un câblage électrique, par lequel transitent l'énergie du générateur au moteur ,et les informations relatives aux contrôles de sécurité.

Une infrastructure hydraulique qui conduit l'eau du puits, jusqu'aux points de distribution [29].

III.4.LES COMPOSANTS D'UN SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

III.4.1. Le générateur photovoltaïque

Pour obtenir des puissances supérieures, il est nécessaire d'associer en série et en parallèle plusieurs modules. Dans certaines applications, il est possible d'utiliser un ou plusieurs modules de quelques dizaines de cellules. Pour des utilisations plus importantes, les générateurs PV sont groupés dans un champ de plusieurs modules (quelques centaines).

La courbe de fonctionnement I-V d'une association série-parallèle de modules solaire saura une évolution de fonctionnement semblable à la courbe de la cellule de base, mais en modifiant les échèles sur les deux axes. Les performances d'un générateur PV sont déterminées à partir de ces courbes.

En utilisant l'équation ci-dessous, pour un groupement mixte formé à partir d'un nombre N_s module en série et N_p module en parallèle [30] :

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{N_s V + \frac{I N_s R_s}{N_p}}{n N_s V_T} \right) - 1 \right] - \frac{N_s V + \frac{I N_s R_s}{N_p}}{\frac{N_s R_p}{N_p}}$$

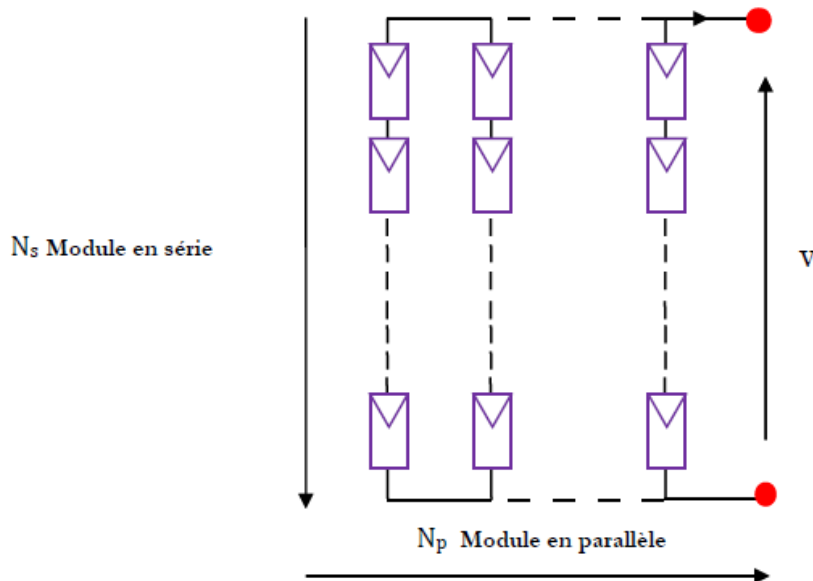


Figure III.3 : Groupement de N_s module en série et N_p en parallèle

III.4.2. L'électronique de commande et de contrôle

III.4.2.1. Le convertisseur DC/DC (Hacheur)

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur PV et de la transférer à la charge (pompe alimentée par moteur à courant continu), la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle commandé par son rapport cyclique, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale disponible [31].

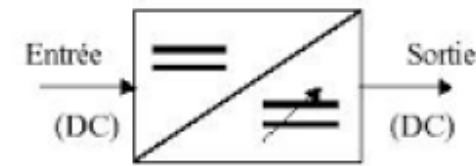


Figure III.4: Conversion DC / DC.

III.4.2.2. Le convertisseur DC/AC

Le convertisseur DC/AC ou onduleur est un appareil servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative [32]. En général, Il assure la conversion du courant continu produit par les panneaux en courant alternatif identique à celui du réseau. Il est donc indispensable pour l'alimentation des charges à courant alternatif. Le choix de l'onduleur dépend des caractéristiques électriques de la pompe alimentée (puissance et tension) [33].

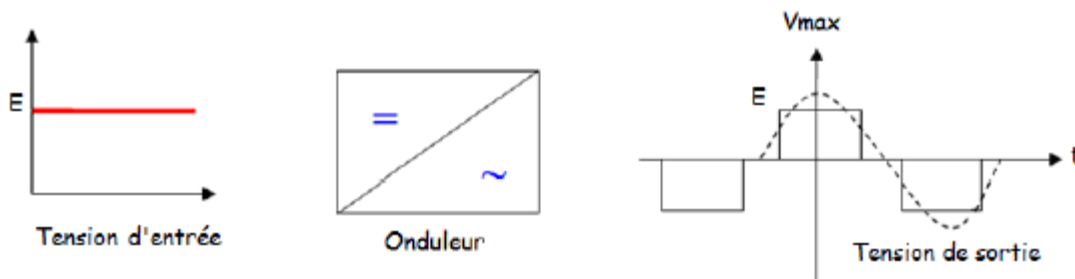


Figure III.5 : Conversion DC / AC.

III.4.3. Régulateur de charge solaire

Le régulateur est un dispositif électronique qui permet de contrôler et de piloter le processus de charge (recharge) d'une ou plusieurs batteries. Le régulateur s'intercale entre le système de production d'énergie (panneau solaire photovoltaïque, éolienne, hydro turbine ou turbine hydroélectrique, etc.) et le dispositif de batterie. C'est un maillon important car il protège vos batteries des surcharges et permet même dans certains cas (régulation MPPT) d'optimiser le rendement de votre dispositif de production. Plusieurs régulateurs peuvent être installés au sein de la même installation.

III.4.4. Le groupe électropompe

La classification des pompes peut se faire selon différents critères : conception de la pompe, sa position dans le système et le type du moteur utilisé. [34]

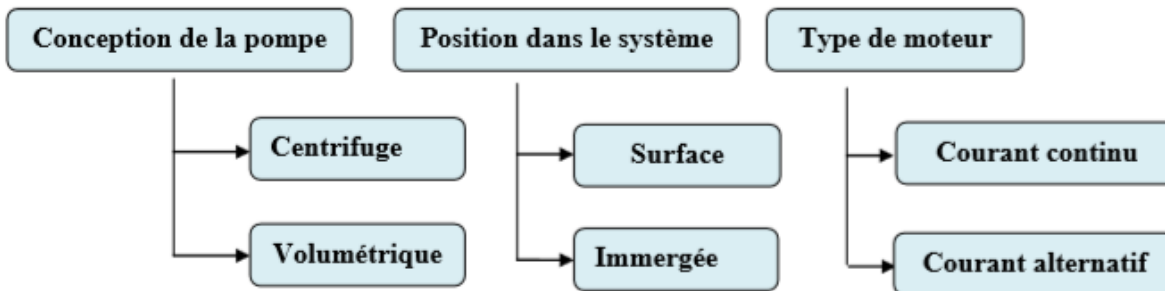


Figure III.6 : Classification des pompes

III.4.4.2. Les pompes

On appelle pompe toutes machines hydrauliques qui servent à déplacer les liquides d'une région de basse pression vers une région à grande pression. Son fonctionnement consiste à produire une différence de pression entre la région d'aspiration et la région de refoulement au moyen de l'organe actif (piston, roue,...etc.) de la pompe. Du point de vue physique, la pompe transforme l'énergie mécanique en énergie hydraulique [35].

III.4.4.2.1. Différents types des pompes

L'énergie requise pour faire fonctionner une pompe dépend des nombreux facteurs rencontrés dans l'étude des écoulements [36] :

- Les propriétés du fluide : masse volumique, viscosité, compressibilité.
- Les caractéristiques de l'installation : longueur, diamètre, rugosité, singularités ...
- Les caractéristiques de l'écoulement : vitesse, débit, hauteur d'élévation, pression ...

III.4.4.2.2. Classification selon la conception de la pompe

Devant la grande diversité de situations possibles, on trouve un grand nombre de pompes quel'on peut classer en deux grands groupes [37] :

- **La pompe volumétrique** [38] transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va et vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement. Elle comporte








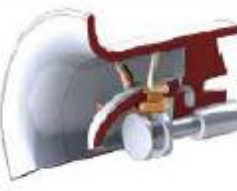
toujours une pièce mobile dans une pièce creuse qui déplace le liquide en variant le volume contenu dans la pièce creuse. Le principal intérêt des pompes volumétriques est de pouvoir véhiculer un fluide sous de très fortes pressions. Mais elles ne conviennent que pour des débits faibles, ce qui rend leur emploi très limité pour l'alimentation en eau des cultures.

- **La pompe centrifuge** La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique totale relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit.

La puissance consommée, proportionnelle à $Q * HMT$, variera donc dans le rapport du cube de la vitesse. On utilisera habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres). [39], [40]

L'utilisation d'un type de pompes ou d'un autre dépend des conditions d'écoulement du fluide.

Tableau III.2. Classification des pompes

	Pompes Rotatives		
Pompes volumétriques	Pompe à vis	Pompe à engrenages	Pompe à palettes
			
	Pompes Alternatives		
	Pompe à pistons	Pompe à membrane	
			
Pompes roto-dynamique	Pompes centrifuges	hélico centrifuges	Pompes hélices
			

III.4.4.2.3. Classification selon la position de pompe :

En fonction de l'emplacement physique de la pompe, nous distinguons : Les pompes de surface, et les pompes immergées [41].

1. 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.

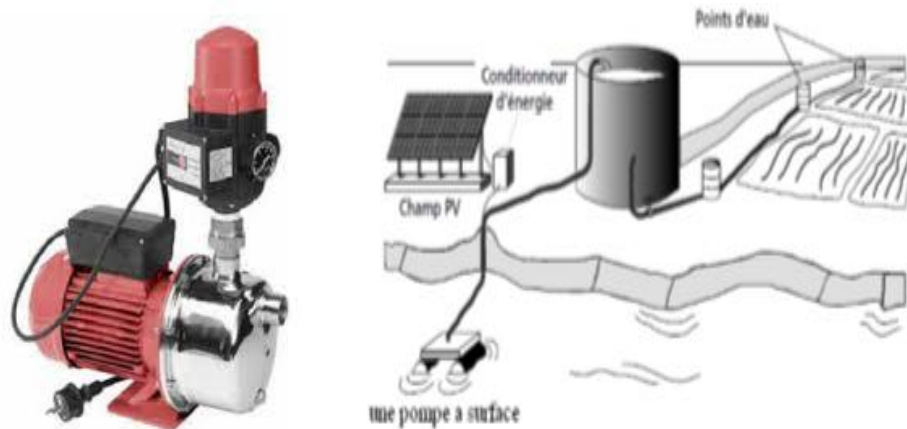


Figure III.7: Pompes de surface.

2. Pompes immergées :

Les pompes de refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface. La transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, selon la puissance du moteur.



Figure III.8: Pompe immergée.

III.4.4.2.4. Caractéristiques des pompes volumétriques et centrifuges

Tableau III.3. Caractéristiques des pompes volumétriques et centrifuges [29][42].

Pompe volumétrique	Pompes centrifuge
<ul style="list-style-type: none"> - Faible débit et une grande hauteur manométrique totale. -Le débit et la puissance absorbée sont proportionnels à la vitesse. -Le couple est en fonction de la HMT. -Le couple de démarrage est de 3 à 5 fois le couple nominal. 	<ul style="list-style-type: none"> - Grand débit -Le débit est proportionnel à la vitesse lorsqu'elle atteint une certaine valeur -La puissance absorbée est proportionnelle au cube de la vitesse -Le Couple est en fonction du carré de la vitesse. -La pression est proportionnelle à la vitesse -Couple de démarrage est quasiment nul, ce qui est intéressant dans l'application du système photovoltaïque car la pompe peut tourner à un faible ensoleillement et le moteur peut avoir une vitesse de rotation rapide, à peu constant

III.4.4.2.5. Classification selon les types de moteur :

La pompe nécessite une énergie mécanique en entrée. Cette énergie mécanique est fournie dans la plupart des cas par un moteur électrique (électropompe), qui peut être à courant continu ou alternatif, et d'autre cas par un moteur thermique (Motopompe) Diesel ou essence [43].

1. Moteur à courant continu : [30]

L'énergie électrique appliquée à un moteur est transformée en énergie mécanique en variant le sens du courant circulant dans un le rotor soumis à un champ magnétique produit par 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. Les moteurs à balais sont les plus communs, mais leurs balais doivent être changés périodiquement. Ceci est particulièrement problématique dans le cas des pompes à moteur immergé où la pompe doit être retirée du forage pour changer les balais. De plus, l'isolation du moteur ne doit pas être compromise afin de ne pas la fragiliser aux infiltrations d'eau.

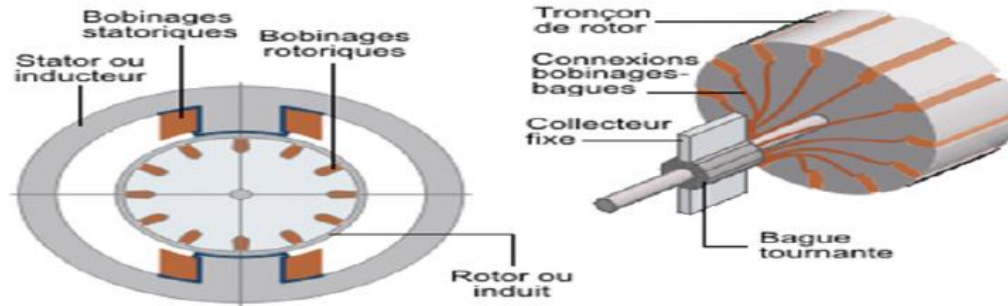


Figure III.9: Moteur à courant continu. [44]

Les moteurs à courant continu utilisés pour des applications de pompage solaire sont les moteurs série, avoir un couple de démarrage suffisant pour vaincre la résistance de démarrage d'une pompe et bien répondre à un courant variable. Le couplage est direct ou avec optimisation du générateur par un hacheur adaptateur de puissance commandé par son rapport cyclique (Figure III.10). L'installation ainsi définie nécessite une électronique relativement simple mais présente l'inconvénient du moteur à courant continu qui demande un entretien régulier.

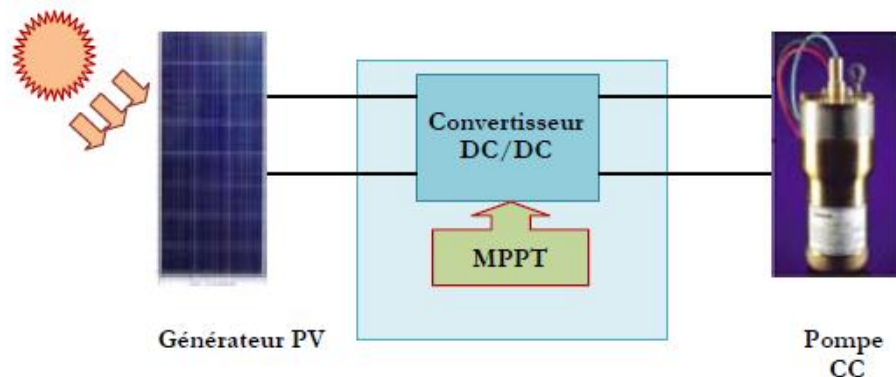


Figure III.10 : Diagramme du pompage PV par motopompe à CC

2. Moteur à courant alternatif :[30]

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 [30]:** La machine synchrone est souvent utilisée comme génératrice. On l'appelle alors « alternateur ». Mis à part pour la réalisation de groupe électrogène de faible puissance, cette machine est généralement triphasée. Pour la production d'électricité, les centrales électriques utilisent des alternateurs dont les puissances peuvent avoisiner les 1 500 MW.

Comme le nom l'indique, la vitesse de rotation de ces machines est toujours proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent.

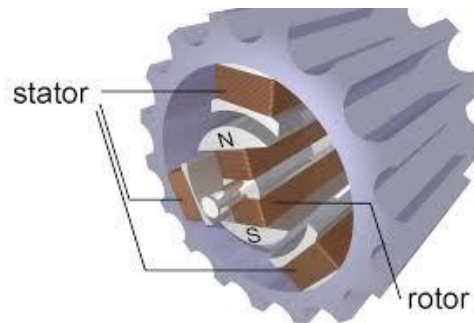


Figure III.11: Moteur synchrone. [44]

- **Les moteurs asynchrones : [45]**

La machine asynchrone, connue également sous le terme d'origine anglo-saxonne de « machine à induction », est une machine à courant alternatif sans alimentation électrique du rotor. Le terme anglais provient des courants induits dans le rotor par induction magnétique.

Le terme « asynchrone » provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent.

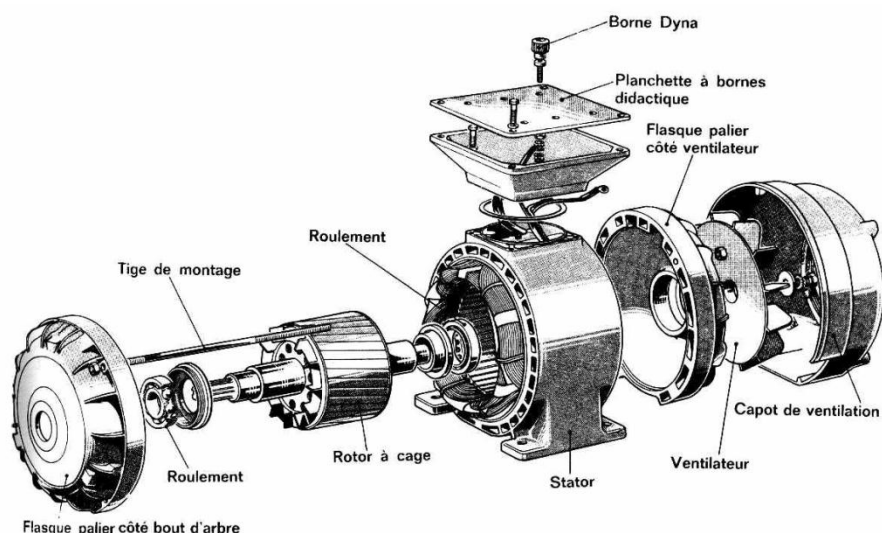


Figure III.12: Moteur asynchrone. [45]

L'utilisation d'un moteur asynchrone (à courant alternatif triphasé), plus robuste moins cher et sans entretien, devient une solution plus économique et plus pratique même au prix d'un circuit électronique de commande plus complexe pour les systèmes de pompage photovoltaïques.

Par exemple, les pompes sur réseau utilisent depuis longtemps ce type de moteur. Il est utilisé particulièrement pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts. L'arrivée d'onduleurs efficaces a permis l'utilisation de ce type de moteurs dans les applications de pompage solaire. L'utilisation d'un moteur asynchrone (à courant alternatif triphasé) plus robuste et moins cher (aussi faible besoin de maintenance) devient une solution plus économique et plus pratique même au prix d'un circuit électronique de commande plus complexe. L'utilisation d'un moteur asynchrone augmente ainsi l'autonomie et la fiabilité de l'installation. Le moteur est alimenté par un onduleur (convertisseur DC/AC) qui assure l'optimisation du générateur PV voir (Figure III.13).

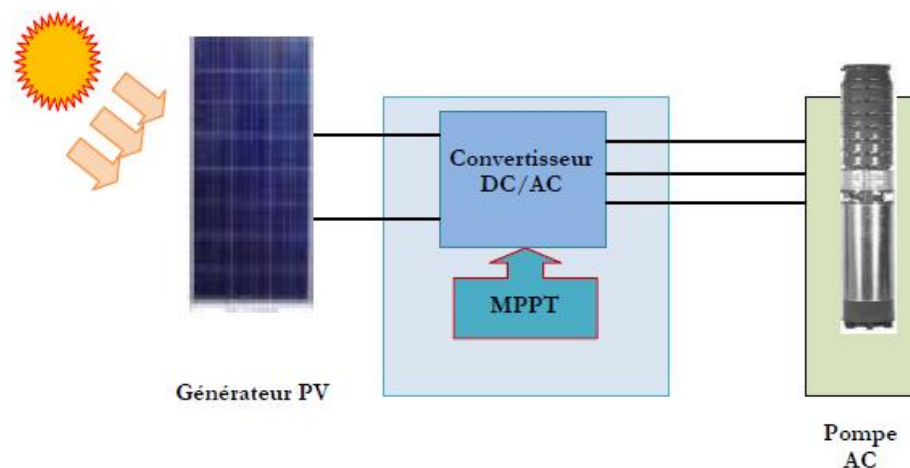


Figure III.13 : Diagramme du pompage PV par motopompe à AC

Quelques avantages et inconvénients de chacun sont donnés ci-dessous :

Tableau III.4. Avantages et inconvénients pour les deux moteurs, MCC et MAS.

Types de moteur	Avantages	Inconvénients
Moteur à courant Continu	Facilité de régulation (variation de vitesse, couple, ...) Rendement de 90%	Coût d'entretien : le système balai/collecteur nécessite beaucoup d'entretiens
Moteur asynchrone	Fiabilité, nécessite peu d'entretien Rendement de 90%	Difficulté et coût de régulation (nécessite la réalisation de commandes vectorielles)

III.4.4.3. La partie stockage

Le stockage d'énergie peut se faire de deux façons: stockage d'énergie électrique ou stockage d'eau. Cette dernière méthode est souvent adoptée car il est plus pratique de stocker l'eau dans des réservoirs que l'énergie électrique dans des accumulateurs lourds, coûteux et fragiles. Aussi, le système de stockage avec batterie génère un coût additionnel, des problèmes de maintenance de la batterie et de l'obligation de la remplacer après 3 à 5 ans d'usage. De plus, le rendement énergétique est meilleur quand il n'y a pas d'accumulateurs. Le réservoir peut souvent être construit localement et la capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours. Ce réservoir ne requiert pas un entretien complexe et est facile à réparer localement.

III.5. DIMENSIONNEMENT DE SYSTÈMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE : [46]

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage sont :

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

III.5.1. Évaluation des besoins en eau :

La détermination des besoins en eau pour la consommation d'une population donnée dépend essentiellement de son mode de vie.

Les besoins en eau que l'on estime nécessaires pour les zones rurales des pays pauvres sont de l'ordre de 20 litres par personne et 30 litres par tête de bétail. Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, des facteurs météorologiques comme la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, la saison de l'année considérée et de la méthode d'irrigation. Cependant, il est important de se baser sur la pratique et l'expérience locale. La capacité du réservoir sera déterminée selon les besoins en eau journalières et l'autonomie requise du système.

III.5.2. Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire :

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

$$Eh = g Pa Va h / 3600 \quad (\text{III.1})$$

où

Eh : énergie hydraulique (Wh/jour)

h : hauteur totale (m)

Va : volume d'eau (m³/jour)

pa : densité de l'eau (1000 kg/m³)

g : accélération de la pesanteur (9,81m/s²)

Durant le processus de pompage, le niveau d'eau à l'intérieur du puits tend à baisser, jusqu'à ce que la vitesse avec laquelle la régénération du puits arrive à équilibrer la quantité pour que l'on puisse pomper l'eau de nouveau. L'abaissement du niveau d'eau dans le puits dépend d'un certain nombre de facteurs, comme le type et la perméabilité du sol et l'épaisseur de l'aquifère. La hauteur totale de pompage est la somme de la hauteur statique et de la hauteur dynamique :

$$h = h_s + h_d \quad (\text{III.2})$$

Dans le cas de puits qui présentent des variations importantes du niveau d'eau en fonction du débit, on peut ajouter un terme correctif et cette équation devient :

$$h = h_s + h_d \left(\frac{h_d - h_s}{Q_p} \right) Q_A \quad (\text{III.3})$$

où

h_s : niveau statique (m)

Q_p : débit d'essai (m³/h)

h_d : niveau dynamique (m)

Q_A : débit apparent (m³/h)

La hauteur statique h_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.

La hauteur dynamique h_d représente les pertes d'eau dans la tuyauterie. La formule de Darcy-Weisbach permet le calcul de la hauteur dynamique :

$$h_d = f \frac{l}{d^2} \frac{v^2}{g} \quad (\text{III.4})$$

où

f : coefficient de friction des parois de la tuyauterie

v : vitesse moyenne du fluide (m/s)

l : longueur de la tuyauterie (m)

d : diamètre de la tuyauterie (m)

g : accélération de la pesanteur (m/s²)

Dans le cas où le système de tuyauterie aurait un autre type d'accessoires (vannes, coudes, tés, jonctions, ...), nous pouvons calculer les pertes de charge dans chaque élément additionnel comme :

$$h_d = K_{ac} \frac{v^2}{2g} \quad (\text{III.5})$$

où

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

Dans le tableau 1, on donne une série de valeurs de K_{ac} pour différents accessoires.

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

Une autre méthode pour tenir compte des accessoires du circuit est d'ajouter à la longueur réelle de la tuyauterie (seulement pour effet de calcul) des longueurs de tubes de même diamètres que le conducteur en étude, capables de causer les mêmes pertes de charge occasionnés par les pièces qu'elles substituent.

De cette façon, n'importe quel accessoire peut être substitué par une longueur fictive .

En général, on recommande que la hauteur dynamique ne dépasse pas 10 % de la hauteur totale de pompage.

III.5.3. Détermination de l'énergie solaire disponible :

La méthode de dimensionnement utilisée est basée sur les calculs des valeurs moyennes journalières mensuelles de l'irradiation solaire disponible et de l'énergie hydraulique nécessaire.

III.5.3.1. Inclinaison du générateur photovoltaïque :

L'inclinaison β des modules photovoltaïques (PV) par rapport au plan horizontal doit se faire de manière à optimiser le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire.

III.5.3.2. Mois de dimensionnement :

Le mois de dimensionnement sera le mois le plus défavorable, c'est-à-dire celui dont le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire soit minimum.

Comme idée de principe, à chaque inclinaison β , correspond un mois le plus défavorable. Le mois de dimensionnement à l'inclinaison optimale sera précisément celui qui présente le plus petit rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique. L'irradiation solaire $G_{dm}(\beta)$ et l'énergie hydraulique nécessaire E_h correspondantes à ce mois serviront pour le choix des composantes du système.

III.5.3.3. Dimensionnement du générateur photovoltaïque :

La puissance de sortie d'un générateur photovoltaïque sous les conditions standards de mesure, CSM, (éclairage $G_{ce} = 1000 \text{ W/m}^2$ et température de cellule $T_{c,ref} = 25 \text{ °C}$) est :

$$P_p = \eta_g A G_{ce} \quad (\text{III.6})$$

Où

P_p : Puissance de sortie sous CSM (W)

η_g : Rendement du générateur à la température de référence (25 °C)

A : surface active du générateur (m²)

G_{ce} : Éclairement dans les CSM (1000 W/m²)

L'énergie électrique journalière, E_e , est donnée par :

$$E_e = \eta_{pv} A G_{dm}(\beta) \quad (\text{III.7})$$

Où

η_{pv} : rendement moyen journalier du générateur dans les conditions d'exploitation

$G_{dm}(\beta)$: irradiation moyenne journalière incidente sur le plan des modules à l'inclinaison β (kWh/m²/jour).

Le rendement η_{pv} peut être calculé à l'aide de l'expression :

$$\eta_{pv} = F_m[1 - \gamma(T_c - T_{c,ref})]\eta_g \quad (III.8)$$

où

F_m : facteur de couplage, défini comme le rapport entre l'énergie électrique générée sous les conditions d'exploitation et l'énergie électrique qui se générerait si le système travaillait au point de puissance maximum.

γ : coefficient de température des cellules.

γ prend des valeurs entre 0,004 et 0.005 /°C pour des modules au silicium mono et poly cristallin, et entre 0,001 et 0,002 pour des modules au silicium amorphe.

T_c : température moyenne journalière des cellules durant les heures d'ensoleillement.

L'énergie électrique nécessaire est liée avec l'énergie hydraulique par l'expression :

$$E_e = \frac{E_h}{\eta_{MP}} \quad (III.9)$$

où

E_h : énergie hydraulique moyenne mensuelle (kWh)

η_{MP} : rendement du sous-système moteur-pompe.

En substituant les équations (III.7), (III.8) et (III.9) dans (III.6), nous obtenons pour la puissance crête du générateur :

$$P_P = \frac{G_{ce}}{F_m[1 - \gamma(T_c - T_{c,ref})]G_{dm}(\beta)\eta_g} E_h \quad (III.10)$$

III.5.3.4. Dimensionnement du moteur Le moteur :

Doit être capable de supporter la puissance crête du générateur photovoltaïque.

III.5.3.5. Dimensionnement de la pompe :

Le débit crête Q (m³/h) est calculé par la relation :

$$Q = \frac{3,6P_h}{gh} \quad (\text{III.11})$$

où

P_h : puissance hydraulique nécessaire (W)

g : accélération de la pesanteur (9.81m/s²)

h : hauteur manométrique totale (m)

La puissance hydraulique crête (P_h) nécessaire en fonction de la puissance électrique crête fournie par le générateur photovoltaïque (P_e) est donnée par :

$$P_h = P_e \eta_{MB} \quad (\text{III.12})$$

où

η_{MB} : rendement crête du sous-système moteur-pompe.

III.5.3.6. Dimensionnement des tuyauteries :

Le diamètre des tuyauteries peut être estimé en utilisant des tableaux ou des graphes qui expriment les pertes par frottements en fonction du débit pour chaque diamètre de la tuyauterie. En pratique, il se présente le problème de fixer la hauteur dynamique h_d pour des considérations économiques. En effet, si nous augmentons le diamètre D de la tuyauterie, h_d diminue. Économiquement parlant, une augmentation de D suppose une augmentation des dépenses d'installation, mais en même temps une diminution des pertes d'énergie. Le diamètre le plus économique sera celui qui réduit au minimum la somme des coûts de la tuyauterie et de l'énergie perdue par frottements [9]. Il est possible d'obtenir analytiquement les diamètres des tuyauteries de pompage qui s'approchent à ceux qui minimisent les coûts des installations par la formule de Bresse :

$$D = K\sqrt{Q} \quad (\text{III.13})$$

D : diamètre de la tuyauterie (m)

K : coefficient qui varie de 0,75 à 1,40

Q : débit crête de la pompe (m³/s)

L'équation de continuité est :

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} v \quad (\text{III.14})$$

Choisir la valeur K équivaut à fixer la vitesse moyenne du fluide (v). Enfin en substituant dans l'équation de continuité la valeur de Q prise de la formule de Bresse, nous avons :

$$V = \frac{4}{\pi K^2} \quad (\text{III.15})$$

Quel que soit la formule employée, les diamètres obtenus diffèrent fréquemment des diamètres commerciaux. Il suffit de prendre la valeur du diamètre commercial le plus proche et d'ajouter les calculs en conséquence.

III.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, deux techniques de pompage photovoltaïque ont été présentées : pompage au fil de soleil et pompage avec batterie. Nous avons montré l'intérêt du pompage dit « au fil du soleil ». On a pu conclure que les systèmes de pompage photovoltaïque les plus courants, selon l'état de l'art actuel, sont constitués d'une pompe munie d'un moteur électrique. Le moteur est alimenté par un générateur photovoltaïque sans batteries, via un convertisseur. Nous avons également montré l'intérêt du pompage dit « au fil du soleil » et le pompage avec stockage d'énergie ainsi que les avantages et les inconvénients de ces deux types de pompage.

Chapitre IV :

Application d'un système de pompage PV sur le site

IV.1. INTRODUCTION :

Nous allons dans ce chapitre, appliquer la méthode de dimensionnement de système de pompage photovoltaïque sur des exemples d'applications réels, répondant à des besoins locaux dans des zones isolées ou désertiques comme Biskra .de plus, souvent, l'anxiété liée à l'investissement prime sur l'efficacité du système. Pour cela nous étudierons également le coût du système.



IV.2. PRINCIPE DU DIMENSIONNEMENT SIMPLIFIE :

- Besoins en eau
- Calcul de la HMT
- Détermination de la Puissance crête
- détermination de nombre des panneaux

IV.3. COMPOSANTS D'UN SYSTEME DE POMPAGE PV :

Un système de pompage solaire est généralement contient:

- Le générateur photovoltaïque
- Le groupe motopompe
- Électronique de commande
- Les éléments du stockage

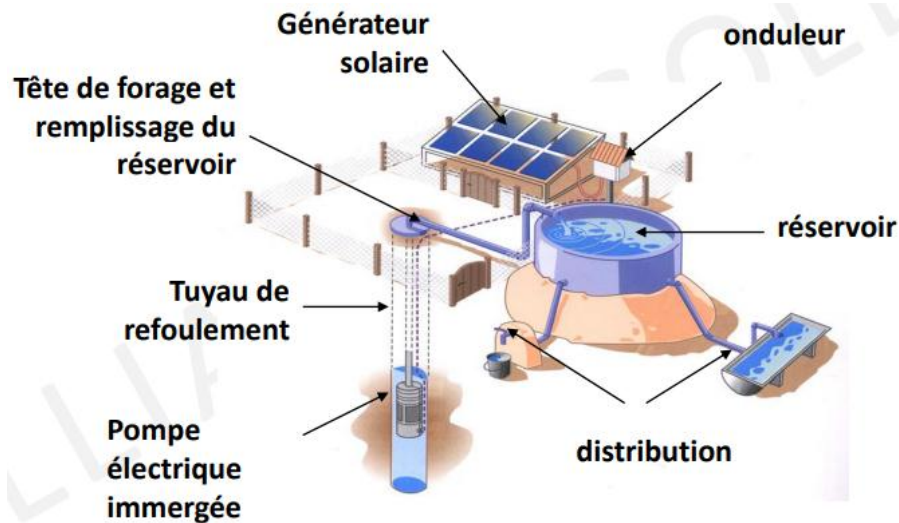


Figure IV. 1 Composants d'un système de pompage PV

IV.4. PRINCIPE DE DIMENSIONNEMENT PV:

IV.4.1. Calcul du besoin journalier théorique E_c :

Energie potentielle nécessaire au relevage d'un volume V (m^3) d'eau/ jour

$$\text{Besoins } E_c = m \times g \times H = V \times \rho \times g \times H \quad (\text{joule/jour})$$

$$= \frac{V \times \rho \times g \times H}{3600} \quad (\text{wh/jour})$$

$$\begin{aligned} \text{besoins energetiques/j} &= \frac{100 \times V \times 9.81 \times HMT}{3600} \quad (\text{wh/jour}) \\ &= 2.725 \times V \times HMT \quad (\text{wh/jour}) \end{aligned}$$

IV.4.2. La hauteur manométrique HMT :

$$HMT = H_g + \text{pertes de charge}$$

$$H_g = a + b + c$$

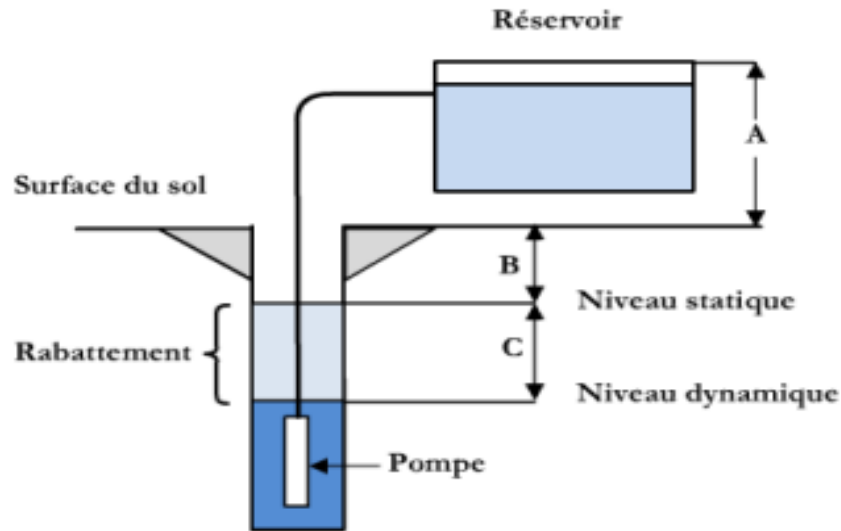


Figure IV.2 La hauteur manométrique HMT

IV.4.3. Le nombre des panneaux PV :

$$N_p = \frac{\text{puissance crete totale}}{\text{puissance crete dans un seul panneaux}}$$

$$P_c = \frac{E_e}{F_c \times E_{ns}}$$

N_p : Nombre des panneaux totaux

F_c : rendement de motopompe

E_{ns} : l'irradiation moyenne journalière incidente sur le plan du générateur

Énergie électrique $E_e = E_c / \text{rendement de motopompe}$

- **En série:**

$$N_{ps} = \frac{V_s}{V_p}$$

N_{ps} : le nombre de panneaux série

V_s : tension de système

V_p : tension nominale de panneaux

- **En Parallèle:**

$$N_{pp} = \frac{N_p}{N_{ps}}$$

IV.4.4. Tension de système :

Cette valeur est déterminée à partir de la puissance crête.

La puissance crête	$pct < 500wc$	$500wc < pct < 2kwc$	$2kwc < pct$
Tension de système	12V	24V	48V

Tableau IV. 1 tension de système

IV.4.5. Choix des pompes :

pompe	p(KW)	η (%)	Φ (m/h)	H(m)
95 PR15N/7	0.37	60	2.5	38
95 PR15N/10	0.55	60	3.33	48
95 PR15N/13	0.75	60	5	42
95 PR15N/18	1.5	60	9	32
95 PR15N/9	2.2	60	10.5	45
95 PR15N/12	3	60	12	55
95 PR15N/16	4	60	13.5	68
95 PR15N/22	5.5	60	15	82
95 PR15N/29	7.5	60	18	71

Tableau IV. 2 Différents types de pompes

IV.4.6.Choix l'onduleur :

Paramètres	Caractéristiques de fonctionnement
Plage de fonctionnement	$80\%V_{nom} < Ve < 160\%V_{nom}$
Tension de sortie nominale	220V
Courent d'entrée nominale	$I_{e_{nom}} = I_{pv_{NOM}} = P_{pv} / V_{nom}$
Courent de sortie nominale	$I_{s_{nom}} = I_{CH_{NOM}} = P_c / 220$
Rendement en puissance	$p \leq 95\%$ a charge nominale P_{nom} $P \geq 80\%$ a partir de $75\% P_{nom}$
Surcharge admissible	$115\% P_c$
Courent de court-circuit	$120\% I_{nom}$

Tableau IV. 3 Choix l'onduleur

IV.5. EXEMPLE EN PRATIQUE :

Nous dimensionnons un système de pompage photovoltaïque, d'approvisionnement en eau pour l'irrigation d'un oasis de 375 de palmiers.

Les données suivantes caractérisent le système :

- **Projet** : Irrigation d'un oasis de 375 de palmiers.
- **Site** : Biskra
- **Irradiation quotidienne** : 5.71 kWh/m²/jour.
- **Débit maximum** : Pour 375 palmiers : 145 m³/jour)
- **Forage** : HMT = 166 m.
- **Module photovoltaïque choisi** :
 Poly-cristallin IBC Solo Sol
 Puissance nominale : 150 Watt.
 Tension nominale : 12 Volt.

IV.5.1. Résultats du dimensionnement :

1. Calcul du besoin journalier E_c :

$$E_c = 2,725 * 145 * 166 = \underline{65591 \text{ Wh/j.}}$$

2. Energie électrique $E_e = E_c / \text{Rendement de motopompe}$

$$E_e = 65591 / 0,6 = \mathbf{109318 \text{ Wh/j.}}$$

$$P_c = E_e / (f_c * E_{nc}) = 109318 / (0,65 * 5,71) = \mathbf{29454 \text{ Watt}}$$

3. Nombre des panneaux = $29454 / 150 = 196$ panneaux

3.1. Nombre des panneaux série :

$$N_s = 48 / 12 = 4 \text{ panneaux}$$

3.2. Nombre des panneaux parallèle :

$$N_p = 196 / 4 = 49 \text{ panneaux}$$

4. Cout totale

Cout totale = (nombre des panneaux * le prix un seul des panneaux) + le prix d'onduleur + le prix de motopompe + accessoire

$$\text{Cout} = (196 * 1.500.000,00) + 5.700.000,00 + 31.000.000,00 + 10.000.000,00 = 3.407.000,00 \text{ DA}$$

IV.6. CONCLUSION :

Nous avons présenté dans ce chapitre la méthode de dimensionnement de système de pompage photovoltaïque, nous avons appliqué un exemple d'irrigation de palmiers, qui affecte particulièrement la région de Biskra. 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.

Conclusion Générale

L'utilisation de l'énergie solaire dans les sites isolés pour différentes applications tel que le pompage d'eau présente un intérêt très important.

L'énergie photovoltaïque est totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins. La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de son propriétaire.

Il faut comprendre que pour produire l'eau, mais avec un coût abordable, trois conditions doivent être étudiées soigneusement :

Premièrement, l'amélioration de la captation d'ensoleillement par les panneaux solaires afin récupérer le maximum d'énergie possible.

Deuxièmement, l'exploitation maximale de l'énergie captée afin de tirer le maximum de puissance électrique disponible au niveau du générateur PV.

Il est intéressant de voir les méthodes qui optimisent la production d'énergie, par exemple introduire un système de poursuite du point de puissance maximal (MPPT), utilisation du système de suivi du soleil.

La troisième et dernière condition concerne le dimensionnement optimal du système de pompage, une bonne installation, une bonne orientation des modules solaires et un bon dimensionnement permet d'exploiter l'énergie de façon optimale.

Ce mémoire a porté sur l'étude et le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque. Ces systèmes se présentent comme une solution idéale pour l'alimentation de l'eau pour les régions peu peuplées, isolées et enclavées. Pour améliorer les performances d'un système de pompage photovoltaïque, on est amené à améliorer les performances de chaque élément de ce système, il est composé d'un générateur photovoltaïque, d'un convertisseur et d'une pompe entraînée par un moteur (Moteur à courant continu, asynchrone, synchrone..). La commande des convertisseurs permet la poursuite du point optimale de puissance du générateur photovoltaïque le stockage de l'énergie électrique n'a pas été introduit sous réserve de doter le système d'un stockage utilisant des réservoirs d'eau.

Un système de pompage solaire de l'eau est généralement composé des éléments suivants:

- Des panneaux solaires photovoltaïques pour capter l'énergie du soleil et la convertir en électricité.
- Une unité de conditionnement de puissance, constituée d'un convertisseur permettant de faire varier la fréquence et la tension de sortie en fonction de la puissance disponible du générateur solaire.
- Une pompe immergée ou montée en surface constituée d'un moteur électrique à courant alternatif ou continu.

Un câblage électrique, par lequel passe l'énergie du générateur au moteur, et les informations relatives aux contrôles de sécurité. Une infrastructure hydraulique qui conduit l'eau de sa source (puits), jusqu'aux points de distribution.

Par conséquent, le développement de ce type d'énergie décentralisée, en particulier dans le sud de notre pays, est très recommandé, car il permet l'accès à l'électricité et à l'eau, dans n'importe quel endroit, de façon aisée, à moindre coût et sans pollution. Aussi, il permet le développement de l'agriculture dans les zones rurales, ce qui crée du travail et permet la sédentarisation des populations

Références Bibliographiques

- [1] BELAID LALOUNI Sofia, " Cours Energie Solaire Photovoltaïque" Université A.MIRA de BEJAIA, 2014/2015.
- [2] Abdelkader Mekemeche, "Modélisation À Deux Dimensions Des Propriétés Physiques De Celluls Solaires Au Silicium À Base De Substrat De Type N, Étude De Quelques Cas Particuliers De Cellules Innovantes", Thèse De Doctorat, L'Université Abdel Hamid Ibn Badis De Mostaganem, 2017.
- [3] Soltane Belakehal, "Conception &Commande Des Machines À Aimants Permanents Dédiées Aux Energies Renouvelables", Thèse Doctorat, Université De Constantine.
- [4] ANTONIO LUQUE AND STEVEN HEGEDUS, "Handbook Of Photovoltaic Science And Engineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003
- [5] "Intelligent Énergie Europe" .Énergie Bits.Com
- [6] AKLI YAMINA ET RAHALI DJAMILA, "Modélisation D'un Panneau Photovoltaïque Et Etude Comparative", Thèse De Master U. Tizi-Ouzou 2012.
- [07] M. Dahbi, "Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne", Thèse de Doctorat, Université de Bechar, 2007.
- [8] Bendali Braham Mounir ET Khelif Mahdi "Étude Et Simulation D'une Chaîne De Production Photovoltaïque", Thèse De Master UNIVERSITE. Badji Mokhtar -Annaba 2018
- [9] Souheyla Merad Née Mamoun, "Dimensionnement D'une Installation Photovoltaïque D'un Lieu Peu Fréquenté : Cas D'un Cabanon Situé À Marsat Ben M'Hidi(Tlemcen)", Master LMD, L'université Abou Ben Belkaid Tlemcen, 2010.
- [10] Q. Kou, S.A. Klein, W.A. Beckman : "A method for estimating the long-term performance of direct-coupled PV pumping systems", Solar Energy, Volume 64, Issues 1–3, September 1998, Pages 33–40
- [11] Abdelkader Mekemeche, "Modélisation À Deux Dimensions Des Propriétés Physiques De Cellules Solaires Au Silicium À Base De Substrat De Type N, Étude De Quelques Cas Particuliers

De Cellules Innovantes", Thèse De Doctorat, L'Université Abdel Hamid Ibn Badis De Mostaganem, 2017.

[12] Salaheddine Bensalem, "Effets De La Température Sur Les Paramètres Et Caractéristiques Des Cellules Solaire", Université Farhat Abbas- Setif, Mémoire De Magister, 2011.

[13] A. AZIZ, "Propriétés Électriques Des Composants Électroniques Minéraux Et Organiques, Conception Et Modélisation D'une Chaîne Photovoltaïque Pour Une Meilleure Exploitation De l'Énergie Solaire", Thèse De Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, France, 2006.

[14] ZIDANE Ammar, « Etude Et Dimensionnement D'une Installation Photovoltaïque Au Niveau D'un Puits De Gaz» Mémoire De Master, Université Abderrahmane Mira De Bejaïa (Promotion Juin 2012).

[15] ZERROUKI Zolikhha Et BEREKSI REGUIG Rym "Dimensionnement D'un Système Photovoltaïque Autonome", Mémoire De Master, Université Abou Bakr belkaid De Tlemcen (2016 / 2017).

[16] MANSOUR Salaheddine, " Etude De Dimensionnement Optimal D'une Station Solaire Autonome En Site Isolé", Mémoire De Master, Université Abou-Bakr belkaide De Tlemcen (23 Juin 2014).

[17] C. Hua And C. Shen, "Comparative Study Of Peak Power Tracking Techniques For Solar Storage System ", IEEE Applied Power Electronics Conference And Exposition, 15-19 February, Anaheim, CA, USA, 1998.

[18] OUMNAD, "Électronique fondamentale" , École Mohammedia Des Ingénieurs, Site internet, [Http://Z.Oumnad.123.Fr](http://Z.Oumnad.123.Fr).

[19] R. C. Neville, "Solar Energy Conversion: The Solar Cell" Studies In Electrical And Electronic Engineering. Elsevier Scientific Publishing Company, Vol 1, New York, N.Y, 1978.

[20] P. ROUX, " Théorie Générale Simplifiée Des Semi-Conducteurs", Site Internet[http:// Philippe.Roux.7.Perso.Neuf.Fr/](http://Philippe.Roux.7.Perso.Neuf.Fr/).

- [21] C. R. Sullivan and M. J. Powers, " High-efficiency maximum power point tracker for photovoltaic arrays in a solar-powered race vehicle", The 1993 IEE E 24th Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC Record, pp 574-580, Seattle, WA,USA, 1993.
- [22] LAHOUEL Asma, "Influence de la température sur les caractéristiques d'une cellule solaire à base d'In GaN", Mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaïd, Tlemcen, 2016
- [23] SALAMA F., " Modélisation D'un Système Multi Générateurs Photovoltaïques Interconnectés Au Réseau Électrique", Mémoire De Magister, Université De Sétif, 2011.
- [24] OUABDELKADER Katia, MERSEL Houria, " Modélisation Et Contrôle D'un système Photovoltaïque Connecté Au Réseau", Mémoire De Master, Université abderrahmane Mira De Bejaia, 2015.
- [25] BELGHITRI H., "Modélisation, Simulation Et Optimisation D'un Système Hybride éolien-Photovoltaïque", Mémoire De Master, Université Kasdi merbah Ouargla, 2009.
- [26] Mr. Mohamed El Amine Khaled BEN ALOUACH , "Modélisation, Simulation Et Optimisation D'un Système Energétique De Production Photovoltaïque Associé À Un Accumulateur", MÉMOIRE DE MAGISTER EN PHYSIQUE , UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAÏD DE TLEMCEN 25 Novembre 2013.
- [27] A Mahjoubi, Ridha Fethimechlouch "Dimensionnement D'une Installation Solaire De Pompage D'eau Pour L'irrigation Goutte à Goutte Au Climat De Médenine", Jerba (Tunisie) 15-16-17/12/2009 Actes Du 3ème Meeting International.
- [28] M. L. LOUAZENE, " Etude Technico-Economique D'un Système De Pompage Photovoltaïque Sur Le Site De Ouargla", Thèse De Magistère, Université EL HADJ LAKHDAR– BATNA, 2008.
- [29] LAFIA 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.

- [30] http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_électrique, 14 avril 2018.
- [31] Cédric CABAL, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Thèse de doctorat soutenue le 15 décembre 2008.
- [32] M. Adouane, "Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique", Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [33] Alain Ricaud, " Convertisseurs photovoltaïques ", *Nov 2007*.
- [34] B. Multon, H. B. Ahmed, N. Bernard, " Les Moteurs Electriques Pour Applications De Grande Série", Pierre-Emmanuel CAVAREC Antenne De Bretagne De l'Ecole Normale Supérieure De Cachan, Revue 3EI Juin 2000.
- [35] Ben Salaheddine Faouzi Ouahranihouda, " Mise Au Point D'un Banc D'essai D'une Motopompe Centrifuge" , Mémoire De Master 2017, Université A. Mira De Bejaia.
- [36] Amine BELAID, "Etude Et Conception D'une Pompe Centrifuge ", Mémoire De Master 2017, Université De Biskra.
- [37] OURS BLANC DES CARPATHES, "Introduction A C++ Builder", Isima 1988-1999, Http://Eric.Univ-Lyon2.Fr/~Ricco/Cours/Cours/Intro_Cpp_Builder.Pdf
- [38] A. BELHOCINE Et S.ZAIDI, " Etude Et Dimensionnement D'un Système De Pompage Photovoltaïque Autonome" Mémoire De Master2. Université De Bejaïa, 2012.
- [39] J. Royer Thomas, D E. Schiller: "Le Pompage Photovoltaïque". Manuel de cours à l' intention des Ingénieurs Et Des Techniciens. IEPF/Université d'Ottawa/EIER.
- [40] R. Chenni, " Etude Technico-Economique D'un Système De Pompage Photovoltaïque Dans Un Village Solaire". Thèse De Doctorat, Université Mentouri De Constantine, 2007.
- [41] BERNT LORENTZ GmbH&Co. KG, Système De Pompe Solaire Immergée Pour Puits 4".
- [42] <Http://Www.Blackmersmartenergy.Com/Fr/Comparativedata/Centrifugal-Pumpsvs-Positive-Displacement-Pumps.Html>, 14 Avril 2018.

[43] Jean-Loup PRENSIER – Christophe DAUX, "La Chaîne D'énergie Du Pompage De L'eau", Edite Le 17/05/2006.

[44] https://fi26.bulot-fr.com/wiki/index.php?title=Machine_synchrone , 14 Avril 2018.

[45] M. T. BOUKADOUM, A. HAMIDAT et N. OURABIA, " Le Pompage Photovoltaïque" Revue des Energies Renouvelables. : Zones Arides pp (69- 73) ,2002.

[46] A. Hadj Arab ,M. Benghanem Et A. Gharbi , " Dimensionnement De Systèmes De Pompage Photovoltaïque", Faculté De Génie Electrique, U.S.T.H.B., B.P. 32, El-Alia, Bab-Ezzouar, Alger 2005.