

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :
Énergies Renouvelables
Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

ETUDE ET OPTIMISATION DE DIMENSIONNEMENT D'UN DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE EN UTILISE LOGICIEL PVSYST

Présenté par :

- Aissaoui Ahmed Walid
- Gherbi Mohammed Amine
- Kaddour Moussa

Soutenu le : 07/07/2020..... devant le Jury :

| | | | |
|------------------------------|------------|-----------------------------------|---------------------|
| <i>M. Benmohammed Fayçal</i> | <i>MAA</i> | <i>Centre Universitaire Naâma</i> | <i>Président</i> |
| <i>M. Khessam Medjdoub</i> | <i>MCB</i> | <i>Centre Universitaire Naâma</i> | <i>Encadreur</i> |
| <i>M. Bouddou Riyadh</i> | <i>Phd</i> | <i>Centre Universitaire Naâma</i> | <i>Co-Encadreur</i> |
| <i>M. Brahimi Mohammed</i> | <i>MAA</i> | <i>Centre Universitaire Naâma</i> | <i>Examineur</i> |

Naama – Algérie - 2020

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience durant toutes les années d'études, et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons à représenter nos vifs remerciements à notre cher professeur Mr. Medjdoub KHESSAM pour avoir accepté de nous encadrer, pour sa permanente gentillesse et pour ces précieux conseils tout au long de notre travail.

Nous remercierons profondément monsieur Dr. Riyadh BOUDDOU, pour son aide constante et bénéfique tout au long de notre travail.

Nous tenons aussi à remercier les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Merci

Dédicace

Nous dédions ce mémoire

A Nos pères et mères

*Pour leur patience, leur amour, leur soutien et
leurs encouragements.*

A nos frères.

A nos amis et nos camarades.

*Sans oublier tout les professeurs que ce soit
du primaire, du moyen, du secondaire ou de
l'enseignement supérieur.*

Walid, Moussa, Amine

ملخص :

تعتبر الطاقة الشمسية من أهم الطاقات المتجددة التي تستعمل في المناطق النائية، المعزولة أو البعيدة عن شبكة توزيع الطاقة الكهربائية لما لها من فوائد كثيرة. من بين المجالات التي تستعمل فيها نجد مجال ضخ المياه، لكن هناك عدة مشاكل تعرقل استعمالها نذكر من بينها غلاء تكلفتها وكفاءة ضعيفة، إن تطور المغناطيس الدائمة والإلكترونيك الاستطاعة أعطت دفع ملحوظ في تطوير الآلات الكهربائية الدوارة بسرعات متغيرة في هذا المنوال تم إنجاز هذه المذكرة التي من خلالها قمنا بنمذجة، وتحجيم نظام ضخ المياه، هذا النظام يتكون من عدة أجزاء تشارك فيما بينها، وهي مولد الطاقة الشمسية، منظم الطاقة، المحرك والمضخة.

Résumé :

L'énergie solaire est l'une des énergies renouvelables les plus importantes utilisées dans les zones isolées ou éloignées du réseau pour la distribution d'énergie électrique en raison de ses nombreux avantages. Parmi les domaines dans lesquels nous utilisons le domaine du pompage de l'eau, mais il y a plusieurs problèmes qui entravent son utilisation, nous mentionnons parmi eux le coût élevé et le faible rendement, que le développement des aimants permanents et de l'énergie électronique a donné une impulsion significative au développement de machines électriques tournantes à vitesse variable dans cette veine. Au cours de laquelle nous avons modélisé et mis à l'échelle le système de pompage d'eau, ce système se compose de plusieurs parties partagées entre elles, qui sont le générateur solaire, le régulateur de puissance, le moteur et la pompe.

Abstract :

Solar energy is one of the most important renewable energies that are used in isolated areas, or far from the grid for the distribution of electrical energy because of its many benefits. Among the areas in which we use the field of water pumping, but there are several problems that hinder its use, we mention among them the high cost and low return, that the development of permanent magnets and electronic power has given a significant impetus in the development of rotating electric machines at variable speeds in this vein. During which we modeled and scaled the water pumping system, this system consists of several parts that are shared among them, which are solar generator, power regulator, motor and pump.

| | |
|---|------|
| Remerciements | i |
| Dédicace..... | ii |
| Résumé | iii |
| Tables des Matières | iv |
| List des Figures | viii |
| Liste des tableaux | xi |
| Nomenclature | xii |
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre I : Généralités sur les systèmes à énergie photovoltaïque | |
| I.1- Introduction | 4 |
| I.2- Energie solaire photovoltaïque | 4 |
| I.2.1- Irradiation solaire | 5 |
| I.2.2- Cellule photovoltaïque..... | 5 |
| I.2.3- Caractéristique courant – tension (I-V) d’une cellule photovoltaïque | 6 |
| I.2.4- Caractéristiques puissance-tension (P-V)..... | 7 |
| I.2.5- Type des cellules photovoltaïques..... | 8 |
| I.2.6- Modèle d’une cellule solaire | 11 |
| I.2.7- Association des cellules..... | 11 |
| I.2.7.1 - Association série | 12 |
| I.2.7.2 Association parallèle | 12 |
| I.2.7.3 Association mixte | 13 |
| I.2.8 Influence du rayonnement sur les cellules | 13 |
| I.2.9 Influence de la température sur le rendement des cellules..... | 14 |
| I.3 - Le champ photovoltaïque | 15 |
| I.3.1 le générateur photovoltaïque | 16 |
| I.3.2 le module photovoltaïque..... | 16 |
| I.4 - Systèmes à énergie photovoltaïque | 17 |
| I.4.1 - Système photovoltaïque d’alimentation électrique | 17 |
| I.4.2 - Système P.V raccordé au réseau | 18 |
| I.4.3 - Système photovoltaïque de pompage d’eau..... | 18 |

| | |
|---|----|
| I.5 - Secteurs d'application | 19 |
| I.6 - Conclusion | 20 |
| Chapitre II : Modélisation des éléments du système de pompage photovoltaïque | |
| II.1. Introduction | 21 |
| II.2. Description du système à étudier | 21 |
| II.3. Modélisation du système | 22 |
| II.3.1. Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque | 22 |
| II.3.3. Modélisation de d'hacheur survolteur..... | 23 |
| II.3.4. Modélisation du convertisseur Buck-boost | 24 |
| II.3.5. Modélisation du convertisseur DC/AC (onduleur) | 25 |
| II.3.6. Modélisation de la pompe..... | 27 |
| II.3.6.1 Le pompage solaire | 27 |
| II.3.6.1.1 Pompage « au fil du soleil » | 27 |
| II.3.6.1.2 Pompage avec stockage d'énergie | 28 |
| II.3.6.2 Le groupe de motopompe | 28 |
| II.3.6.2.1 Classification selon la conception de la pompe | 29 |
| a) Pompe centrifuge | 29 |
| b) Pompe volumétrique..... | 30 |
| II.3.6.2.2 Classification selon la position de pompe..... | 31 |
| a) Pompes de surface | 31 |
| b) Pompes immergées..... | 31 |
| II.3.6.2.3 Classification selon le moteur utilisé..... | 32 |
| a) Moteur à courant continu | 32 |
| b) Moteur à courant alternatif..... | 33 |
| II.3.7. Le modèle électrique de la batterie | 34 |
| II.4. Rendement d'un système de pompage photovoltaïque | 34 |
| II.5. Les pertes de charge | 36 |
| a) Pertes de charge linéaires | 36 |

| | |
|---|----|
| b) Pertes de charge singulières | 36 |
| II.6. Conclusion..... | 37 |
| Chapitre III : Dimensionnement et gestion de l'énergie du système de pompage photovoltaïque avec batteries | |
| III.1. Introduction | 38 |
| III.2. Applications de l'énergie électrique solaire dans le pompage de l'eau | 38 |
| III.2.1. Composants du système de pompage électrique solaire | 40 |
| III.3. Méthode de dimensionnement | 42 |
| III.3.1 Estimation des besoins en eau | 42 |
| III.4. Détermine la source d'eau | 43 |
| III.5. Commodité de l'emplacement de la source d'eau solaire..... | 44 |
| III.6. Dimensionnement du réservoir | 45 |
| III.7. Dimensionnement du groupe motopompe | 46 |
| III.7.1. Pompe..... | 46 |
| III.7.2. Donnée de base | 46 |
| III.7.3. Le débit..... | 46 |
| III.7.4. La hauteur manométrique totale | 47 |
| III.7.5. Calcul de l'énergie journalière requise..... | 51 |
| III.7.6. Le point de fonctionnement..... | 52 |
| III.8. Dimensionnement du générateur photovoltaïque | 53 |
| III.8.1. Détermination de la charge (calcul de l'énergie quotidienne requise)..... | 53 |
| III.8.2. Énergie requise pour la pompe | 53 |
| III.8.3. Calcul du champ photovoltaïque | 53 |
| III.8.4. La puissance crête du générateur photovoltaïque | 54 |
| III.8.5. Le nombre de modules photovoltaïques..... | 54 |
| III.9 Logiciel PVsyst | 54 |
| III.9.1 Définition..... | 54 |
| III.9.2 But de l'utilisation..... | 55 |
| III.9.3 Principe de fonctionnement..... | 55 |

| | |
|--|----|
| III.9.3.1 Pré dimensionnement | 55 |
| III.9.3.2 Conception du projet | 56 |
| III.10. Conclusion..... | 57 |
| Chapitre IV : Simulation et discussion des résultats | |
| IV.1 Introduction..... | 58 |
| IV.2 Les composants d'un système de pompage PV | 59 |
| IV.3 Les étapes de dimensionnement de l'installation..... | 59 |
| IV.3.1 Evaluation des besoins en eau | 59 |
| IV.3.2 Rayonnement solaire | 60 |
| IV.3.3 Hauteur manométrique total | 60 |
| IV.4 Dimensionnement de la station de pompage | 60 |
| IV.4.1 Choix de la pompe | 61 |
| IV.4.2 La capacité du réservoir | 61 |
| IV.4.3 Le convertisseur DC/DC (Controller) | 61 |
| IV.4.4 Les panneaux photovoltaïques | 62 |
| IV.5 Simulation numérique | 63 |
| IV.5.1 Données géographiques | 63 |
| IV.5.2 Coordonnée géographique..... | 63 |
| IV.5.3 Données météorologiques | 64 |
| IV.6 Conception du projet | 65 |
| IV.6.1 Les étapes de conception d'un système de pompage PV | 65 |
| IV.7 Résultats et discussions de la simulation numérique..... | 69 |
| IV.8 Conclusion | 78 |
| Conclusion générale | 79 |
| Annexes | |
| Références Bibliographique..... | |

Chapitre I : Généralités sur les système à énergie photovoltaïque

| | |
|---|----|
| Figure I.1: présentation schématique d`une cellule photovoltaïque | 6 |
| Figure I.2 : Caractéristique courant – tension (I-V)..... | 7 |
| Figure I.3 : Caractéristique puissance-tension (P-V) | 8 |
| Figure I.4 : cellule monocristallin | 8 |
| Figure I.5 : cellule polycristallin | 9 |
| Figure I.6 : cellule amorphe | 9 |
| Figure I.7 : Schéma équivalent de cellule PV | 11 |
| Figure I.8 : groupement des cellules en série | 12 |
| Figure I.9 : groupement des cellules en parallèle | 12 |
| Figure I.10 : Influence de rayonnement sur la caractéristique..... | 13 |
| Figure I.11 : Influence de la puissance sur la caractéristique P-V..... | 14 |
| Figure I.12 : Influence de la température sur la caractéristique I-V | 14 |
| Figure I.13 : Influence de la température sur la caractéristique..... | 15 |
| Figure I.14 : champ photovoltaïque | 16 |
| Figure I.15 : module photovoltaïque | 17 |
| Figure I.16 : système photovoltaïque autonome | 17 |
| Figure I.17 : Système photovoltaïque raccordé au réseau | 18 |
| Figure I.18: système de pompage d'eau | 19 |

Chapitre II : modélisation du système de pompage photovoltaïque

| | |
|---|----|
| Figure II.1 : Système globale de pompage photovoltaïque | 21 |
| Figure II.2 : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque, modèle simplifié à une diode | 23 |
| Figure II.3 : Hacheur parallèle..... | 24 |
| Figure II.4 : fonction principale de l'onduleur | 25 |
| Figure II.5 : Circuit de l'onduleur | 25 |
| Figure II.6: Pompage photovoltaïque au fil du soleil | 27 |
| Figure II.7 : Pompage photovoltaïque avec stockage d'énergie..... | 28 |
| Figure II.8 : Classification des pompes..... | 28 |
| Figure II.9 : Schéma d'une pompe centrifuge | 29 |

| | |
|--|----|
| Figure II.10 : Schéma d'une pompe volumétrique | 30 |
| Figure II.11 : Pompes de surface | 31 |
| Figure II.12 : Pompe immergée | 32 |
| Figure II.13 : Moteur à courant continu avec balais | 32 |
| Figure II.14 : Schéma synoptique simplifié du pompage PV par motopompe DC | 33 |
| Figure II.15 : Schéma synoptique simplifié du pompage PV par motopompe à AC | 33 |
| Figure II.16 : Modèle R-C de la batterie | 34 |

Chapitre III : Dimensionnement et gestion de l'énergie du système de pompage photovoltaïque

| | |
|---|----|
| Figure III.1 : Pompe solaire pour alimenter le village en eau | 38 |
| Figure III.2 : Système d'irrigation électro-solaire | 39 |
| Figure III.3 : Système de pompage électro-solaire alternatif | 41 |
| Figure III.4 : Système de pompage électro-solaire en continu | 41 |
| Figure III.5 : Un modèle de ferme dans laquelle l'eau est distribué sous l'influence de la gravité | 44 |
| Figure III.6 : Où le réservoir d'eau est situé dans l'irrigation | 45 |
| Figure III.7 : Commande de pompe par soupape de débit | 46 |
| Figure III.8 : caractéristique H-Q d'une pompe centrifuge | 48 |
| Figure III.9 : caractéristique Q d'une pompe centrifuge | 49 |
| Figure III.10 : usure due au phénomène de la cavitation | 50 |
| Figure III.11 : caractéristique NPSH-Q d'une pompe centrifuge | 51 |
| Figure III.12 : caractéristique du point de fonctionnement d'une pompe centrifuge | 52 |
| Figure III.13 : Pré dimensionnement de logiciel PVsyst..... | 56 |
| Figure III.14 : Conception du projet de logiciel PVsyst | 57 |

Chapitre IV : Simulation et discussion des résultats

| | |
|---|----|
| Figure IV.1 : Schéma synoptique d'un système de pompage photovoltaïque | 58 |
| Figure IV.2 : Schéma simplifié de Pompage PV | 59 |
| Figure IV.3 : pompe électriques GRUNDFOS SQF 3A-10 | 61 |
| Figure IV.4 : Lorentz PS1800 contrôler, 102Vdc, 200Voc, 1800W | 62 |

| | |
|--|----|
| Figure IV.5 : Panneau solaire JA SOLAR 250 Wp 26 V si-poly JAP6(DG)60-250 | 62 |
| Figure IV.6 : Localisation de site de (Ouargla) | 63 |
| Figure IV.7 : coordonnées géographiques de site (Ouargla) | 64 |
| Figure IV.8 : Paramètres climatiques de site (Ouargla)..... | 64 |
| Figure IV.9 : Conception du projet | 65 |
| Figure IV.10 : Angle d'orientation | 66 |
| Figure IV.11 : Profil de besoins d'eau | 67 |
| Figure IV.12 : Circuit hydraulique de pompage | 67 |
| Figure IV.13 : Choix de la pompe..... | 68 |
| Figure IV.14 : Choix du module et le Controller | 69 |
| Figure IV.15 : Energie incidente de référence sur le plan des panneaux | 70 |
| Figure IV.16 : Distribution de l'irradiation incidente | 70 |
| Figure IV.17 : Les productions normalisées | 71 |
| Figure IV.18 : Facteurs normalisés de production et de perte | 72 |
| Figure IV.19 : Indice de performance | 73 |
| Figure IV.20 : Diagramme d'entrée/sortie journalier..... | 74 |
| Figure IV.21 : Débit en fonction de la puissance à la pompe | 75 |
| Figure IV.22 : Production d'eau journalière selon l'irradiation..... | 76 |
| Figure IV.23 : Distribution de la puissance du champ | 77 |
| Figure IV.24 : Energie journalière à la sortie de champ..... | 77 |

| | |
|---|----|
| Tableau I.1 : les différents types de cellule | 10 |
| Tableau III.1 : Les principaux systèmes d'irrigation conviennent à l'utilisation de pompes solaires | 40 |
| Tableau III.2 : Certaines données sont approximatives pour l'utilisation de l'eau | 42 |
| Tableau IV.1 : Les besoins journaliers moyens mensuels en eau des palmiers / hectare | 60 |
| Tableau IV.2 : Les valeurs globales de l'irradiation journalière mensuelle pour une inclinaison optimale saisonnière | 60 |
| Tableau IV.3 : Tableau de Bilan et résultat principaux | 78 |

Symboles :

G: Ensoleillement (w/m^2)

L : longueur de la canalisation,

D : le diamètre de la canalisation

λ : est le coefficient qui dépend de la rugosité des parois et de la viscosité du liquide

ρ : Masse volumique de l'eau ($1000 \text{ Kg}/m^3$)

Q: Débit volumique (m^3/s)

Rs : Résistance série (Ω)

Rsh : Résistance shunt (Ω)

Impp : Courant au point de puissance maximale, appelé aussi courant optimum (A)

Icc : Courant de court-circuit (A)

Iph: Représente la photo courante, il dépend de l'irradiation et de la température (A)

Ia : Représente le courant de diode(A)

Irsh : Courant de la résistance shunt (A)

Is : Courant de saturation de la diode (A)

Vco : Tension en circuit ouvert (V)

Vmpp : Tension au point de puissance maximale (V)

Pc : Puissance crête (Wc)

Pmax : Puissance au point maximum (W)

Ph: Puissance communiquée au fluide par la pompe (W)

P_{ele}: Puissance électrique du moteur asynchrone (W)

PP: la puissance hydraulique en W

P_{mec} : la puissance mécanique

P_{dc} : représente la puissance fournie par le générateur photovoltaïque

η_P : le rendement de la pompe

η_m : Le rendement du moteur électrique

η_c : Le rendement du convertisseur statique

η_{pv} : Le rendement du générateur photovoltaïque

η_G : Le rendement global du système de pompage photovoltaïque

R_{mp} : Rendement du groupe motopompe (%)

H_a : hauteurs géométriques d'aspiration

H_r : hauteur de refoulement

HMT : la hauteur manométrique

C_H : constante hydraulique

Abréviations :

DC/DC : Convertisseur continu –continu

DC/AC : Convertisseur continu-alternatif

EDC : Etat de charge de la batterie (%)

HMT: Hauteur manométrique totale (m)

NPSH : Net Positive Section Head

PPM: Point de puissance maximum

PV: Panneau photovoltaïque

GPV: Générateur photovoltaïque

C_{batt} : la capacité nominale de la batterie (Ah)

Q_d : la quantité de charge manquante par rapport à C_{batt}.

GlobEff : Global "effectif", corr. pour IAM et ombrages

E_{ArrMPP} : Energie champ, virtuelle au MPP

E_{PmpOp} : Energie de fonctionnement pompe

E_{TkFull} : Energie inutilisée (réservoir plein)

H_{Pump} : Pression totale moyenne à la pompe

W_{Pumped} : Eau pompée

W_{Used} : Eau consommée

W_{Miss} : Eau manquante

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

Au début de ce siècle, la maîtrise de l'énergie en générale et de l'énergie électrique en particulier apparaît non pas comme une réaction à la crise pétrolière de 1973, mais comme énergie de substitution et méthode incontournable pour le développement durable plus particulièrement des régions sahariennes, et pour l'efficacité économique et social qui assure la présence des notions dans la nouvelle carte du monde et qui garantie la pérennité de tout un chacun dans le mouvement irréversible de la globalisation.

Par conséquent l'Algérie est condamnée à s'inscrire dans cette nouvelle perspective et interpelle à fournir les efforts nécessaires pour nous hisser à la hauteur des enjeux géostratégiques économique et sociaux de par sa position géographique.

L'Algérie dispose également d'un important potentiel en énergie solaire et qui n'attend qu'une bonne exploitation. D'autant plus le grand sud et notamment le Sahara algérien caractérisé par un très fort apport solaire avec un gradient de température diurne -nocturne très important, une période de vent de sable accentue surtout pendant la période de mars avril, un été très long presque de 06 mois (allant de mai à octobre) et très chaud dépassant dans certains cas les 50° C à l'ombre.

La raison indispensable ou il faudrait doubler les efforts pour une exploitation optimale utilisant de plus en plus des équipements solaires adapter en milieu saharien, un dimensionnement optimal des systèmes photovoltaïque en milieu saharien satisfaisant les besoins des populations sédentaire.

En effet les efforts développés par les autorités pour le développement de l'énergie solaire ne datent pas d'hier et la création du Centre de Développement des Energies Renouvelable le CDER Alger et l'Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien URER/MS Adrar consolide les différentes études faites sur les systèmes solaires développés en Algérie ou à l'étranger. Mais le comportement des systèmes énergétiques mu par l'énergie solaire reste très peu connu, surtout lorsqu'ils sont installés en milieu saharien et donc mal exploité, par conséquent une utilisation des systèmes photovoltaïques non optimisés.

La technologie photovoltaïque (PV) est une solution attrayante comme remplacement ou complément des sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité en raison de ses nombreux avantages qu'on peut résumer comme suit :

- Un moyen fiable qui requiert peu d'entretien ;
- Elle fournit de l'électricité avec l'énergie gratuite et renouvelable du soleil ;
- Elle ne nécessite aucun combustible ;
- Elle est silencieuse et non polluante respectueuse de l'environnement ;
- Elle est polyvalente et peut être ajustée selon les besoins ;
- Elle est une énergie décentralisée et peut être utilisée au moment même où produite.

Avec une grande facilité de maintenance, l'énergie photovoltaïque peut permettre de couvrir les besoins d'une habitation en électricité tels que l'éclairage, le pompage de l'eau et la production du froid.

Le pompage et les centrales PV sont des applications les plus prometteuses de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque. Ces systèmes PV sont généralement composés d'un générateur PV, d'un système de conditionnement de puissance entre autres un convertisseur d'énergie, une station de batterie et d'une charge, soit du type continu par exemple une machine à courant continu, une lampe, etc. Soit une charge à courant alternatif comme un groupe motopompe, des lampes, des ventilateurs, des téléviseurs, enfin toutes charge DC/ AC.

Due au coût élevé du générateur photovoltaïque et à la désadaptation existante entre les caractéristiques Courant-Tension du générateur PV et de la charge, une grande importance est donnée à leur conception et à leur utilisation optimale qui permettent un fonctionnement fiable et économique. A cet effet le concepteur est intéressé par l'obtention d'un système qui présente une meilleure adaptation entre ses différents composants.

Notre travail qui s'inscrit comme projet de fin d'étude s'oriente vers des applications qui ont un impact direct sur le développement socioéconomique des agglomérations sahariennes isolées tels que le pompage photovoltaïque pour l'irrigation des terres agricoles, l'électrification rurale, le balisage électrique, la téléphonie rurale, tout système photovoltaïque alimenté par un générateur photovoltaïque installé en milieu saharien.

Les systèmes de pompage à base d'énergie solaire photovoltaïque, ont reçu une attention considérable grâce au développement de la technologie dans les convertisseurs photovoltaïques (la photopile), les machines à courant continu sont très utilisées, mais souffrent de problèmes de maintenance par la présence des collecteurs surtout s'ils sont installés en milieu saharien. Cependant, les systèmes de pompage basés sur les moteurs à induction (moteurs asynchrones) peuvent avoir un grand intérêt lorsque les opérations de maintenance et de rendement présentent des problèmes.

Chapitre I

*Généralités sur les systèmes à énergie
photovoltaïque*

I.1 Introduction :

Depuis la généralisation de l'utilisation de l'électricité, la consommation énergétique n'a cessé d'augmenter, elle a triplé d'année 60 à nos jours. Actuellement, les principales sources d'énergie proviennent des combustibles fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole) et depuis les années 50 de l'énergie nucléaire. Cependant, depuis les crises successives du pétrole des années 70, le problème de la conversion et de stockage de l'énergie a conduit à la recherche et au développement de nouvelles sources d'approvisionnement. Cet intérêt s'est accru face à l'épuisement inéluctable des énergies fossiles, à leur impact sur l'environnement et aux déchets qu'elles engendrent.

La chaleur cependant afin de décoloniser et de diversifier l'origine de la production d'électricité. de nouvelles d'énergies dites « énergies renouvelables » ont émergé (photovoltaïque, thermique et thermodynamique, biomasse, éolienne, géothermie, marémotrice, etc.). Elles ont toutes l'immense avantage d'être d'origine naturelle, inépuisables et non polluante. Parmi celles-ci, l'énergie solaire est la mieux partagée par tous les habitants du globe terrestre. Son exploitation permettrait de fournir en électricité des sites isolés des réseaux électriques et éviterait la création de nouvelles lignes électriques qui demandent généralement un lourd investissement.

[1]

Dans le grand sud algérien, particulièrement le milieu saharien, nous disposons d'un potentiel énergétique important, en plus des régions déshérités, désenclavés ou une demande en énergie et frottement exprime, et il suffit de réaliser quelques installations PV, pour une amélioration socioéconomique notable de ces régions.

I.2 L'énergie solaire photovoltaïque :

Tous les jours, le soleil fournit de l'énergie à la Terre. Les humaines peuvent utiliser cette énergie gratuite grâce à une technologie appelée photovoltaïque, qui transforme l'énergie solaire en électricité. Les modules ou panneaux photovoltaïques sont composés de semi-conducteurs qui permettent de transformer directement la lumière du soleil en électricité. Ces modules peuvent s'avérer une source d'énergie qui est sûre, fiable, sans entretien et non polluante pendant très longtemps. La majorité des modules sur le marché aujourd'hui sont pourvus de garanties de plus

de 20 ans, et ils fonctionneront bien au-delà de cette période. Des millions de systèmes ont été installés dans le monde entier, de puissances différentes allant d'une fraction d'un watt à plusieurs mégawatts. Pour de nombreuses applications, les systèmes solaires électriques sont non seulement rentables, mais ils peuvent aussi représenter l'option la moins coûteuse.

I.2.1 L'irradiation solaire :

L'irradiation solaire est la puissance par unité de surface (watt par mètre carré, W/m²), reçue du Soleil sous forme de rayonnement électromagnétique, telle qu'elle est indiquée dans la gamme de longueurs d'onde de l'instrument de mesure. L'irradiation solaire est souvent intégrée sur une période donnée afin de rendre compte de l'énergie rayonnante émise dans le milieu environnant (joule par mètre carré, J/m²), pendant cette période. Cette irradiation solaire intégrée est appelée irradiation solaire, exposition solaire, insolation solaire ou rayonnement solaire. L'irradiation peut être mesurée dans l'espace ou à la surface de la Terre après absorption et diffusion dans l'atmosphère. L'irradiation dans l'espace est fonction de la distance par rapport au Soleil, du cycle solaire et des changements inter cycles [2]. L'irradiation à la surface de la Terre dépend en outre de l'inclinaison de la surface de mesure, de la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon et des conditions atmosphériques [3]. L'étude et la mesure de l'irradiation solaire ont plusieurs applications importantes, notamment la prévision de la production d'énergie des centrales solaires, les charges de chauffage et de refroidissement des bâtiments, ainsi que la modélisation du climat et les prévisions météorologiques.

I.2.2 Cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, est un composant électronique qui transforme directement la lumière solaire en électricité. La cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule.[4]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. Lorsque les photons sont absorbés par les semi-conducteurs, ils transmettent leurs

énergies aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons (charges N) et des trous (charges P) créent 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.

La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul, cette tension est nommée tension de circuit ouvert V_{OC} . Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées ; il est appelé courant de court-circuit I_{SC} et dépend fortement du niveau d'éclairement.

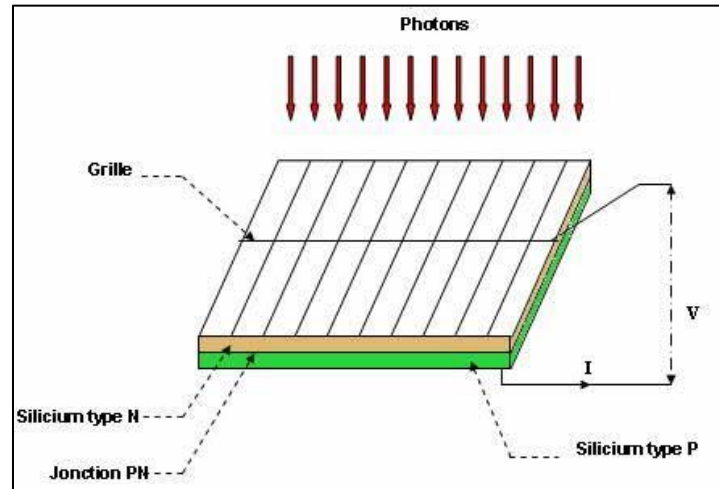


Figure I.1 : présentation schématique d'une cellule photovoltaïque.

I.2.3 Caractéristique courant – tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque :

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe :[5]

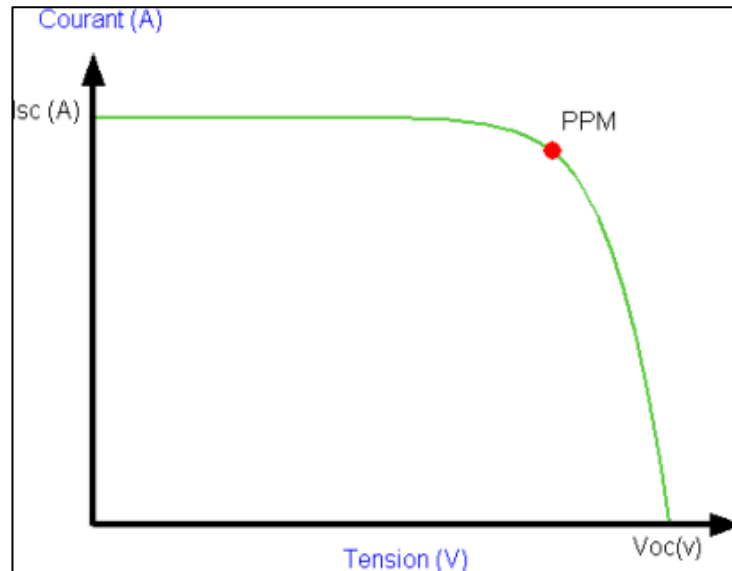


Figure I.2 : Caractéristique courant – tension (I-V)

Sa tension à vide : V_{oc} . Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.

Son courant court-circuit : I_{sc} . Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.

Son point de puissance maximal : MPP (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimal.

I.2.4 Caractéristique puissance-tension (P-V) :

La puissance électrique maximum délivrée dans les conditions suivantes dites conditions standard [4] :

- Éclairement solaire de $1 \text{ kW} / \text{m}^2$
- Température de la cellule PV égale à $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

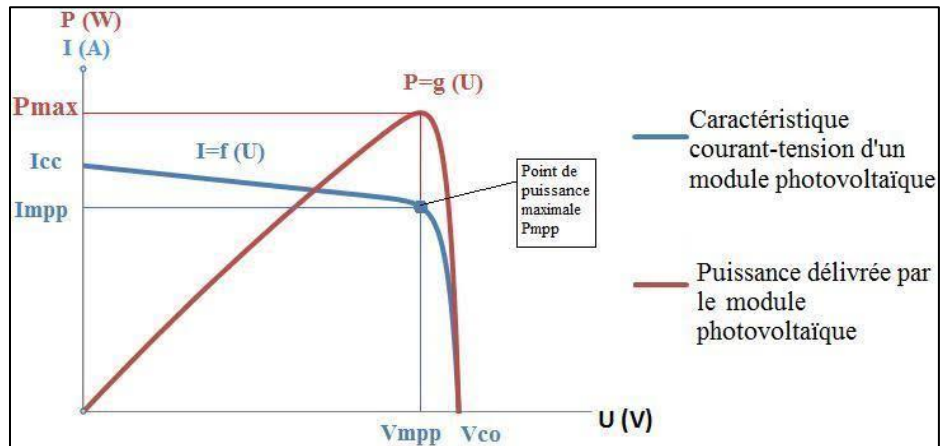


Figure I.3 : Caractéristique puissance-tension (P-V)

I.2.5 Type des cellules photovoltaïques :

Les types de construction des cellules photovoltaïques les plus courantes sont :

- **La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin :**

Cette cellule photovoltaïque offre un rendement d'environ 20 %, l'un des meilleurs sur le marché. La durée de vie des panneaux solaires composés de cellules en silicium monocristallin avoisine les 30 ans, ce qui est très rentable, malgré le coût élevé à l'achat. L'inconvénient de ce type de cellule solaire est qu'elle offre un rendement très faible lorsqu'il n'y a pas assez de soleil. Elle convient donc mieux aux régions les plus ensoleillées.[6]

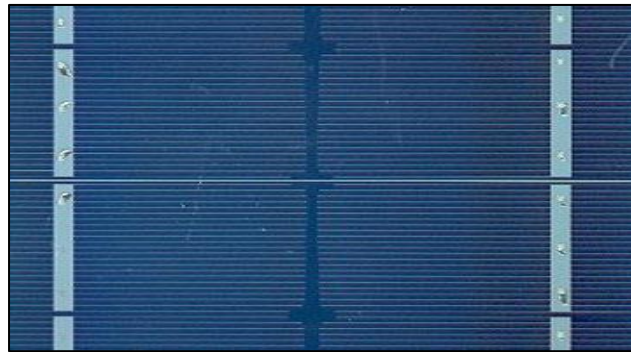


Figure I.4 : cellule monocristalline

• La cellule photovoltaïque en silicium poly-cristallin :

La fabrication de ce type de cellule photovoltaïque est plus simple que la version en silicium monocristallin. Son coût est donc moindre. Côté rendement du panneau solaire, on peut espérer entre 10 et 15 %, ce qui est nettement inférieur aux cellules monocristallines. Elle a cependant l'avantage de pouvoir être utilisée par temps nuageux, ceci grâce à sa flexibilité d'irradiation.[6]

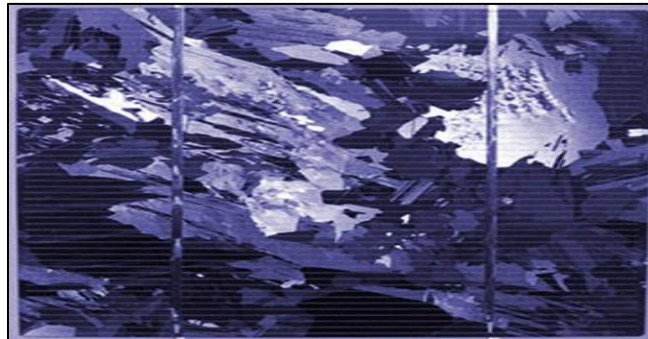


Figure I.5: cellule polycristallin

• La cellule au silicium amorphe :

Cette cellule solaire présente de nombreux avantages. Elle est tout d'abord peu chère à fabriquer. Elle peut aussi être intégrée sur tout type de support, flexible ou rigide. Un autre point positif est qu'elle capte les rayons solaires même par temps nuageux. Son principal inconvénient est qu'elle offre un faible rendement, environ 7 % au maximum. Pour être rentable, il faut donc que la surface du panneau solaire soit conséquente. De même, ses performances diminuent dans le temps. [6]

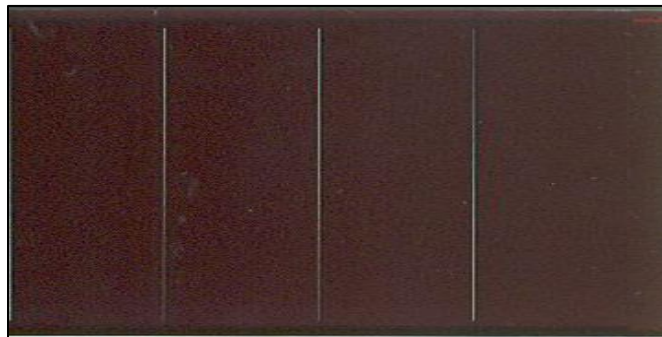


Figure I.6 : cellule amorphe

Le tableau suivant présente les différents types de cellule : [7]

Tableau I.1 : les différents types de cellule

| Matériel | Rendement | Durée du vie | Caractéristiques |
|--|---|--------------|--|
| Silicium Mono cristalline | 12 à 18% <i>(24,7% en Laboratoire)</i> | 20 à 30 ans | <ul style="list-style-type: none"> • Très performant • Stabilité de production d'W • Méthode de production coûteuse et laborieuse. |
| Silicium Poly cristalline | 11 à 15% <i>(19,8% en Laboratoire)</i> | 20 à 30 ans | <ul style="list-style-type: none"> • Adapté à la production à grande échelle. • Stabilité de production d'W. Plus de 50% du marché mondial. |
| Amorphe | 5 à 8% <i>(13% en Laboratoire)</i> | 10 ans | <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 |

I.2.6 Modèle d'une cellule solaire :

La figure suivante (figure I.7) représente le modèle électrique d'une cellule solaire qui consiste en une source de courant idéale, branchée avec une ou deux diodes en parallèle et une résistance série R_s , la première diode $D1$ décrit les propriétés de semi-conducteur de la cellule et la seconde $D2$ modélise le phénomène de recombinaison des porteurs de charge. Le modèle à une diode (empirique) est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante). [8]

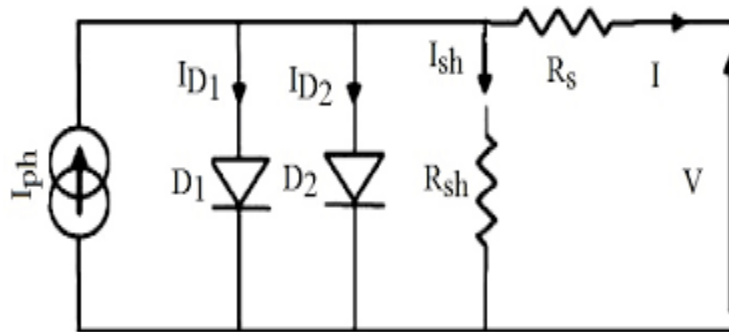


Figure I.7: Schéma équivalent de cellule PV.

I.2.7 Association des cellules :

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale pour une cellule Si (silicium) de 100 cm^2 (10 sur 10) tourne aux alentours de 1,25 W. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes. Les modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires. La connexion en série augmente la tension pour un même courant alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique. Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules. Les modules (généralement présentés sous forme de panneaux) sont constitués d'un certain nombre de cellules élémentaires placées en série afin de rendre la tension à la sortie utilisable. Ces modules sont ensuite associés en réseau (série-parallèle) de façon à obtenir les tensions/courants désirés. [5]

I.2.7.1 Association en série :

Par association en série (appelée « String »), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules.

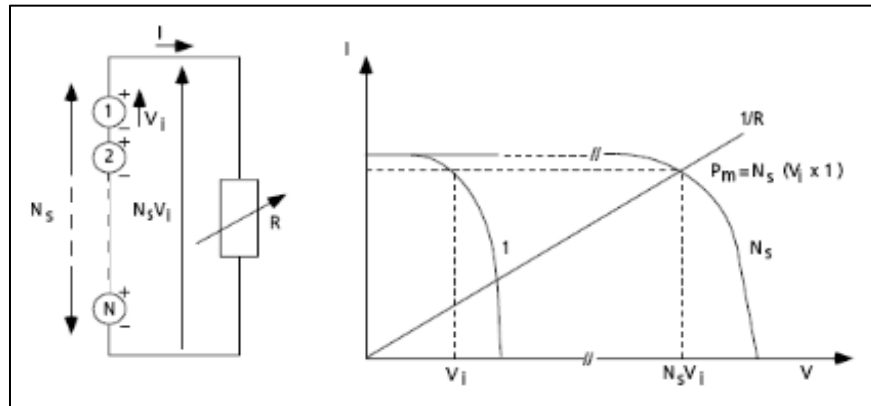


Figure I.8 : Groupement des cellules en série.[9]

I.2.7.2 Association en parallèle :

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

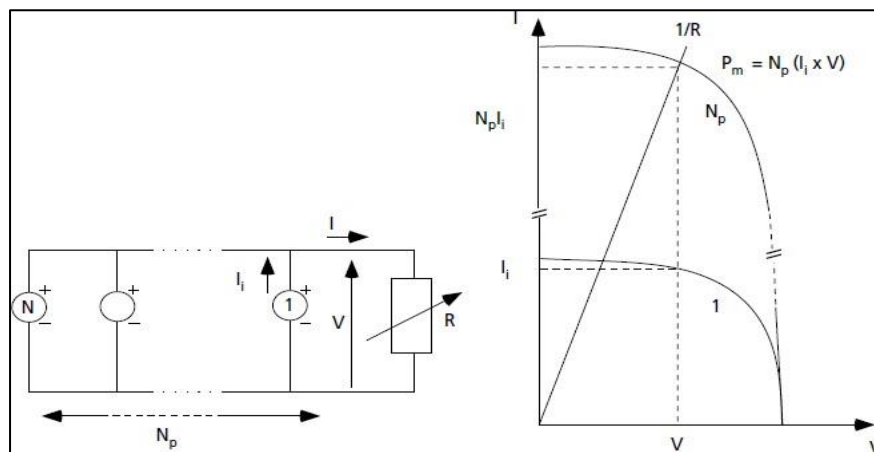


Figure I.9: Groupement des cellules en parallèle.[9]

I.2.7.3 Association mixte :

Pour atteindre une puissance importante, il faut associer plusieurs cellules en série et en parallèle. Cette interconnexion des modules forme un module photovoltaïque.

I.2.8 Influence du rayonnement sur les cellules :

La cellule photovoltaïque réagit différemment selon l'énergie qu'elle reçoit. Plus elle reçoit d'énergie plus elle en restitue, mais toujours avec un coefficient de rendement faible.

La variation des caractéristiques est représentée sur les courbes de la figure I.10. Pour différents niveaux d'irradiation, le changement du courant optimal est important [10].

Selon les conditions météorologiques, nous obtenons différentes courbes avec différentes puissances maximales au cours d'une même journée.

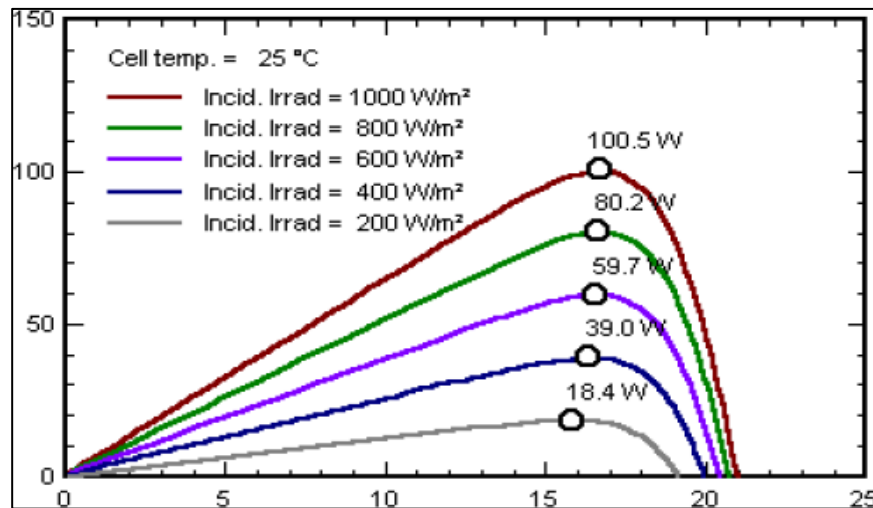


Figure I.10: Influence de rayonnement sur la caractéristique.

Même chose remarquée sur les différentes courbes avec différentes puissances maximales. En fixe la température à 25 c°

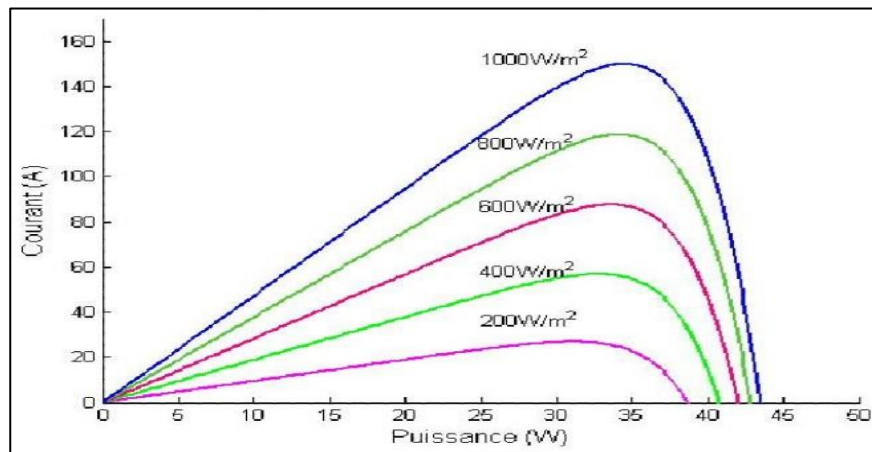


Figure I.11: Influence de la puissance sur la caractéristique P-V

I.2.9 Influence de la température sur le rendement des cellules:

Comme nous l'avons expliqué précédemment, la base des cellules photovoltaïques est une jonction PN. Ceci nous laisse envisager que son rendement variera selon la température de la jonction.[10]

La figure ci-dessous montre que la tension à vide d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule. Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température de la cellule.

En fixe l'éclairement à 1000 W / m^2

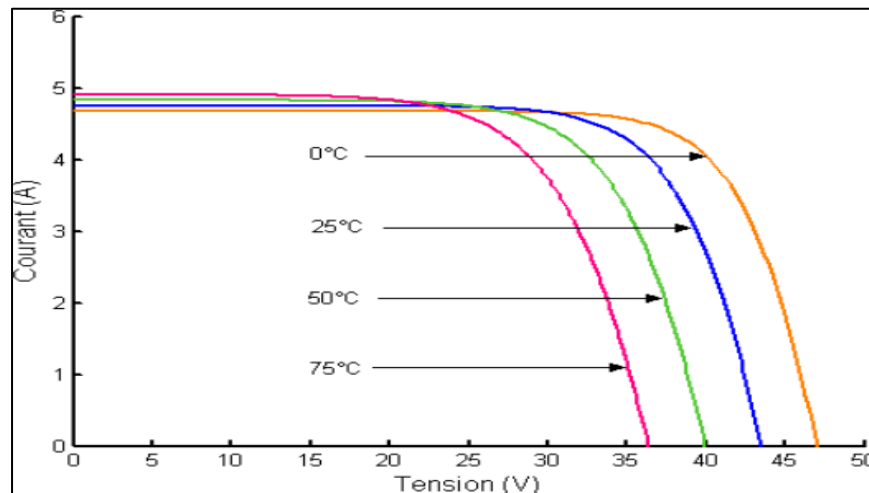


Figure I.12: Influence de la température sur la caractéristique I-V

Même chose remarquée sur la courbe de puissance. En effet, l'augmentation de la température se traduit par une diminution de la puissance maximale disponible [11].

En fixe l'éclairement à 1000 W / m^2

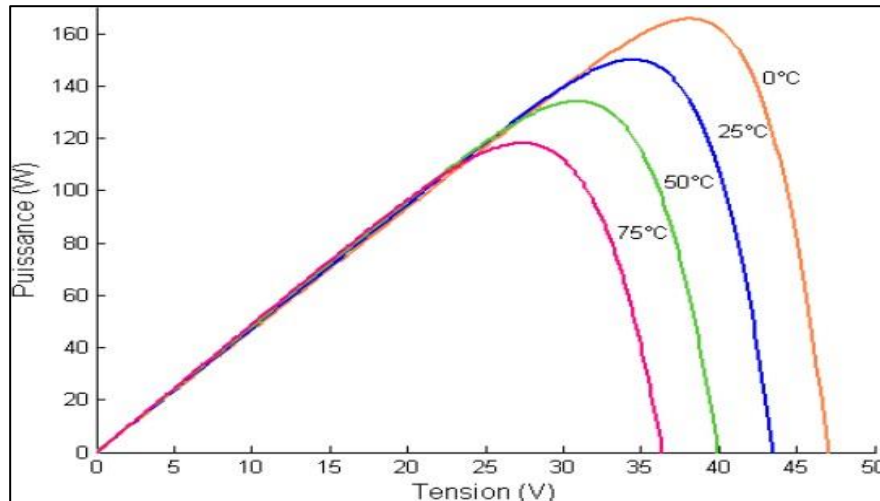


Figure I.13: Influence de la température sur les caractéristiques

I.3 Le champ photovoltaïque :

Les fermes solaires (parfois appelées parcs solaires ou champs solaires) sont l'application à grande échelle de panneaux solaires photovoltaïques (PV) pour produire de l'électricité verte et propre à l'échelle, généralement pour alimenter le réseau. Il est constitué de :

- L'ensemble des modules photovoltaïques.
- Les supports mécaniques de ces modules.
- L'ensemble des liaisons électrique entre les modules.
- L'équipotentielle entre les modules.



Figure I.14 : Champ photovoltaïque.

I.3.2 Le générateur photovoltaïque :

Le générateur PV représente la partie de production d'énergie électrique. Elle est composée d'un ou plusieurs des modules PV. Ces modules sont formés d'un assemblage des cellules photovoltaïque. Ils peuvent être branchés en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant.

I.3.1 Le module photovoltaïque :

Le module PV est par définition un ensemble de cellules assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur électrique de très faible puissance (quelques watts). Les cellules sont généralement mises en séries pour générer une tension utilisable. Afin d'obtenir des puissances de quelques KW sous une tension convenable, il faut associer les modules en panneaux.

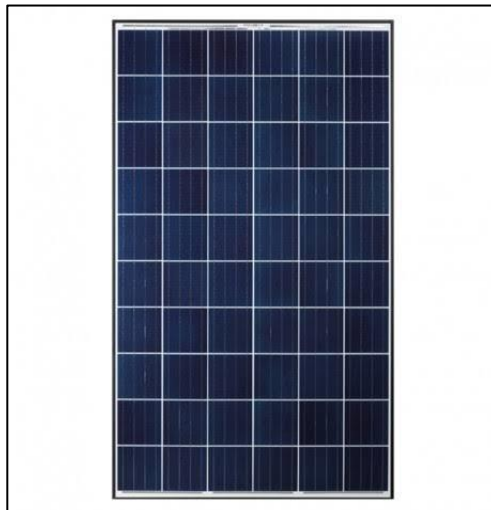


Figure I.15 : Le module photovoltaïque

I.4 Systèmes à énergie photovoltaïque :

I.4.1 Système photovoltaïque d'alimentation électrique :

Un système photovoltaïque isolé alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. C'est bien souvent le seul moyen de s'électrifier lorsque le courant du réseau n'est pas disponible. Ce type de système nécessite l'utilisation de batteries pour le stockage de l'électricité.

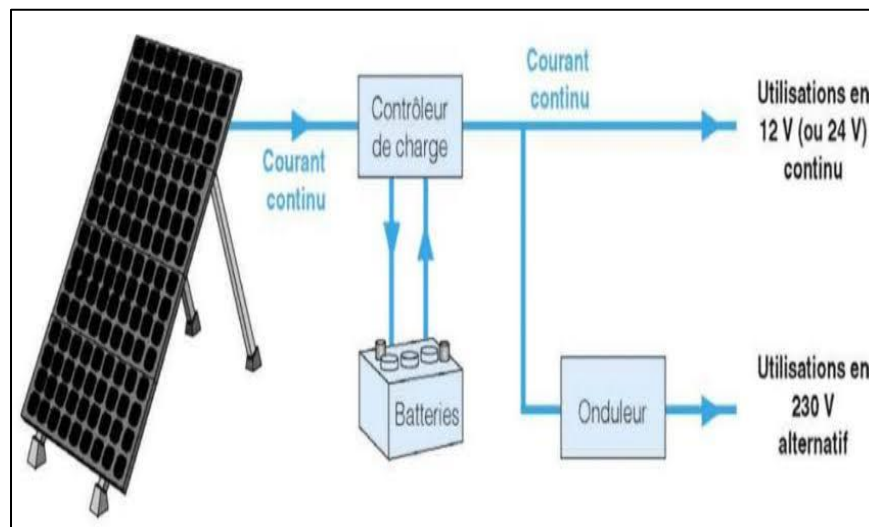


Figure I.16 : système photovoltaïque autonome. [12]

I.4.2 Système photovoltaïque raccordé au réseau :

Ces systèmes sont connectés en permanence au réseau électrique national. Lorsque le générateur photovoltaïque n'est pas en mesure de produire l'énergie électrique nécessaire pour satisfaire la demande d'électricité, le réseau fournit l'énergie demandée. Au contraire, si le système photovoltaïque produit plus d'énergie que nécessaire, l'excédent est transféré au réseau. Ces systèmes n'ont pas besoin de batterie, car le réseau de distribution fournit l'énergie électrique en l'absence de rayonnement solaire.

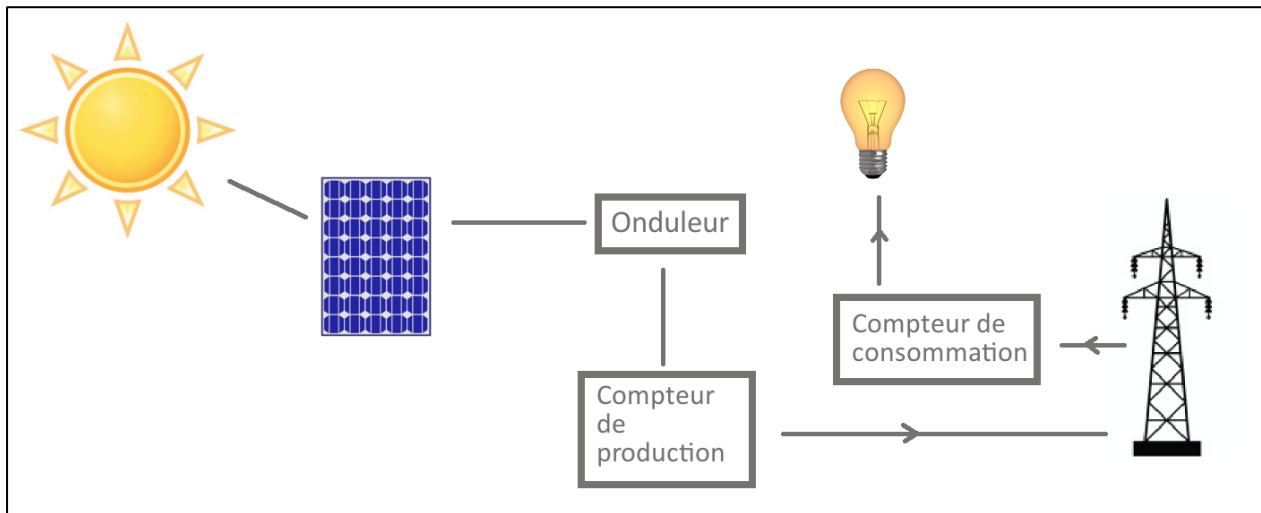


Figure I.17: Système photovoltaïque raccordé au réseau. [13]

I.5 Système photovoltaïque de pompage d'eau :

Le pompage solaire est une technique particulière qui permet d'extraire l'eau du sous-sol grâce à l'énergie solaire photovoltaïque. L'objectif est de garantir l'accès à l'eau, en tous lieux, même les plus éloignés des grands cours d'eau, ainsi qu'aux communautés les plus isolées. Ce type d'installation peut être utilisée dans différents secteurs, tels que : (alimentation en eau pour un usage domestique, pour l'irrigation agricole, ...etc.).

Les avantages d'un système de pompage solaire peuvent être résumés comme ci-dessous :

- Aucun coût pour le carburant, le système n'utilise la lumière du soleil gratuite.
- Toujours disponible.
- Une longue durée de vie opérationnelle
- Un système très fiable et durable

- Facile à exploiter et à entretenir
- Un retour de l'investissement initial est garanti
- Respectueux de l'environnement

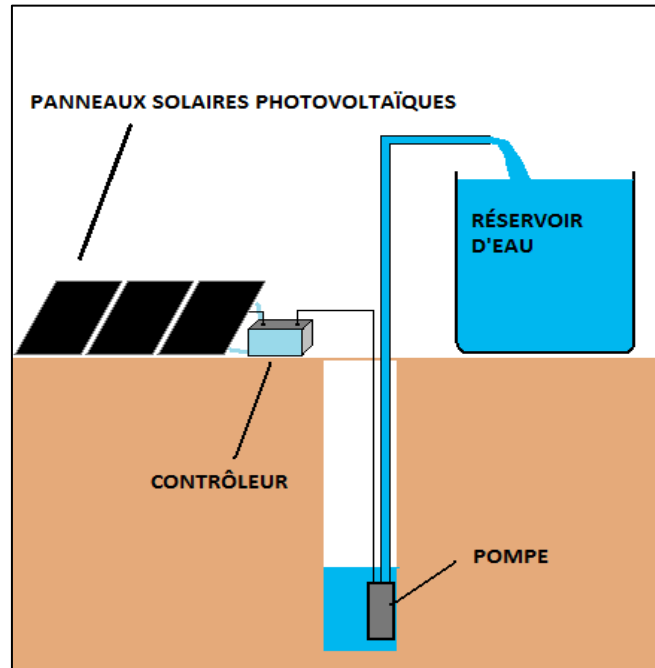


Figure I.18: système de pompage d'eau. [14]

I.6 Secteurs Applications :

- Applications agricoles : Pompage d'eau _ l'irrigation....
- Les applications télécoms : Téléphonie rurale par satellite-Radars....
- Éclairage : Panneaux publicitaires-Lampadaires pour l'éclairage public-Éclairage de tunnels, grottes, ...
- Les applications fixes d'aide aux transports : Signalisation routière et ferroviaire
Balisage aérien et maritime (bouée)

Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque (ensoleillement, effet photovoltaïque, ...etc.), ainsi que les différentes technologies d'une cellule PV, et à travers une étude sur les types de regroupement des cellules nous avons montré comment augmenter le courant ou la tension, et nous avons également étudié l'influence de la température et de l'éclairement sur le rendement du générateur.

Chapitre II

*Modélisation du système de pompage
photovoltaïque*

II.1 Introduction :

La modélisation est une étape essentielle qui doit précéder toute phase de dimensionnement, d'optimisation ou de simulation du système. Le système étudié est un système de pompage photovoltaïque composé particulièrement d'un générateur photovoltaïque (GPV), des convertisseurs statiques et du groupe moteur-pompe. Dans ce chapitre nous présentons les différents modèles mathématiques de chacun de ces éléments composants ce système.

II.2 Description des composantes de système de pompage photovoltaïque :

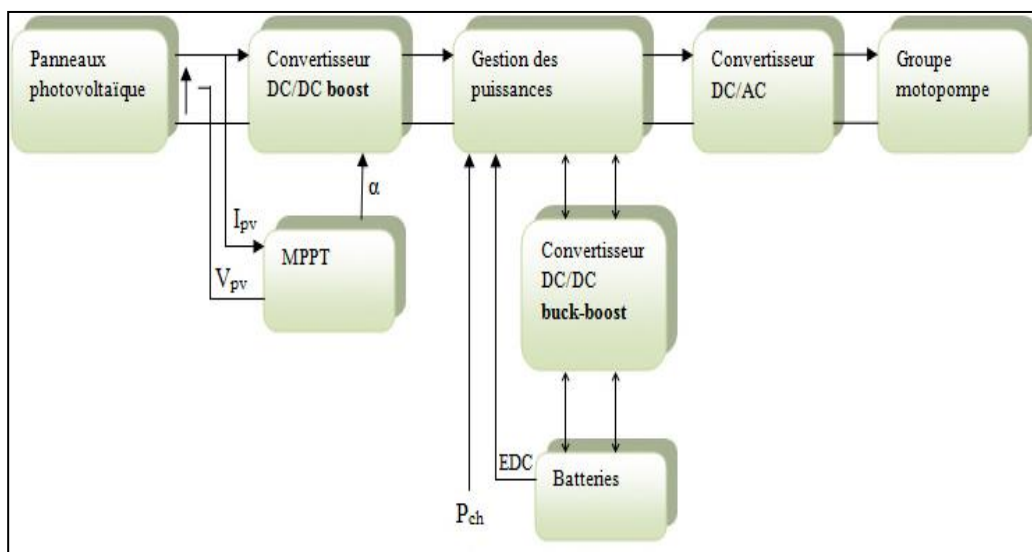


Figure II.1: Système globale de pompage photovoltaïque [15]

Le système de pompage photovoltaïque avec batterie peut être comparé à une charge alimentée par une batterie qui est chargée par un générateur photovoltaïque. Ses éléments de base sont :

- Les panneaux photovoltaïques : permettent l'alimentation de la charge (pompe) et le stockage (batterie).
- La commande MPPT : permet d'extraire la puissance maximale produite par le champ de modules PV.
- La batterie : alimente la charge et assure un stockage de l'énergie électrique.
- Le système de gestion : assure la gestion du flux d'énergie entre les différents composants et protège la batterie contre la surcharge et les décharges profondes.

- Le convertisseur DC/DC : fournit une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe.
- Le convertisseur DC/AC : fournit une tension alternative à partir d'une tension continue.
- Groupe motopompe : convertit l'énergie électrique en énergie hydraulique.

II.3 Modélisation du système :

La modélisation est la représentation d'un système par un autre, plus facile à appréhender. Il peut s'agir d'un système mathématique ou physique. Le modèle sera alors numérique ou analogique.

II.3.1 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque :

Il existe de nombreux modèles de générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul du courant et de la tension.

Parmi ces modèles on trouve : [16]

- **Le modèle idéalisé** : c'est le modèle le plus simplifié, la valeur de la résistance R_{sh} étant généralement très grande, elle est donc souvent supposée infinie (et donc négligée), la valeur de la résistance R_s étant petite elle est supposée être nulle ($R_s = 0$).
- **Le modèle à une diode** : pour tenir compte des chutes de tension dans les zones P et N, on doit ajouter une résistance série dans le modèle idéalisé, une résistance série R_s et pour le courant de fuite, une résistance parallèle R_{sh} .
- **Le modèle à deux diodes** :

Une diode supplémentaire mise en parallèle avec la diode du modèle précédent, permettant de reproduire des effets chimiques de recombinaison des électrons. Par manque de précision du modèle idéalisé et la complexité des autres modèles plus précisés, le modèle à une diode offre un bon compromis entre simplicité et précision. Nous avons choisi un modèle simplifié, qui est un modèle à cinq paramètres (I_{cc} , I_{mpp} , V_{co} , V_{mpp} , R_s), qui tient compte de la variation du courant et de la tension du panneau photovoltaïque en fonction des conditions climatiques.

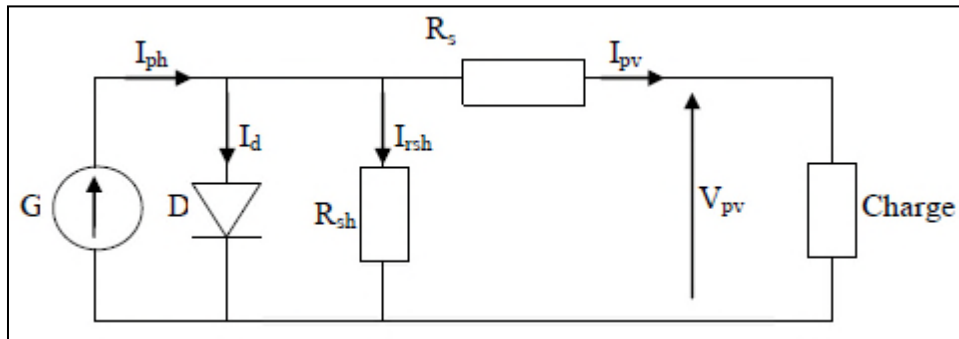


Figure II.2 : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque, modèle simplifié à une diode [15]

D'après la figure le courant I_{pv} du générateur photovoltaïque sous les conditions standards de fonctionnement, est donné par l'équation :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \quad (2.1)$$

I_{ph} : Représente la photo courante, il dépend de l'irradiation et de la température.

I_d : Représente le courant de diode.

R_s : Résistance série.

R_{sh} : Résistance shunt.

I_{Rsh} : Représente le courant shunt.

II.3.3 Modélisation d'hacheur survolteur :

Lorsque l'on désire augmenter la tension d'une source continue, on peut utiliser l'hacheur parallèle de type BOOST, appelé également hacheur survolteur dont le schéma de principe est montré dans la figure. Ce dispositif de l'électronique de puissance qui est un convertisseur continu-continu nous permet d'adapter la tension aux bornes du panneau photovoltaïque à partir d'une stratégie de commande permettant un fonctionnement au point de puissance maximale [17].

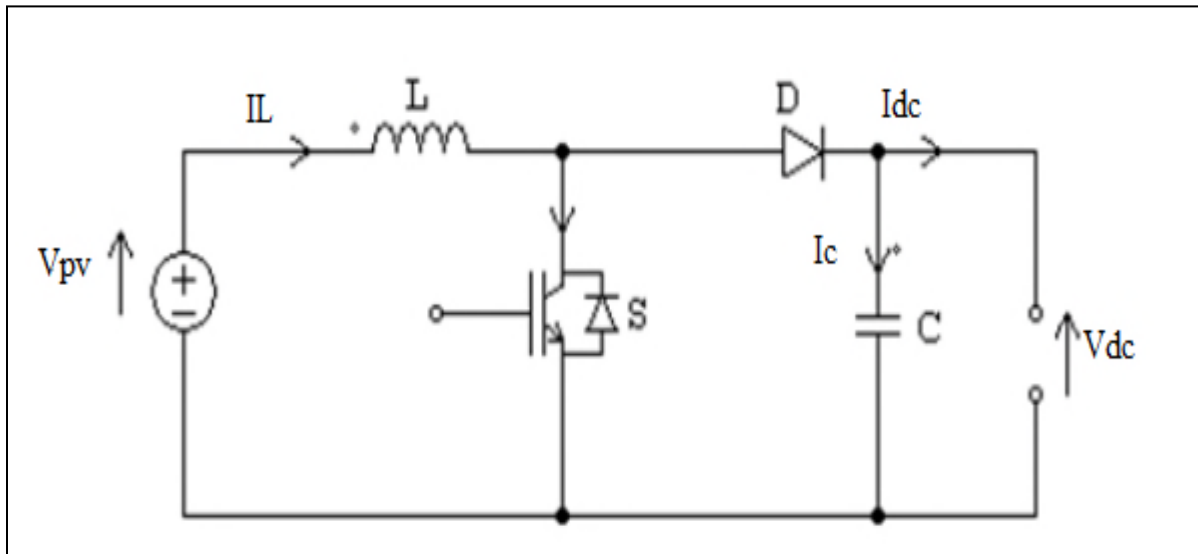


Figure II.3 : Hacheur parallèle (15)

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique α . Son expression est donnée par l'équation. La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique α . [20]

$$V_{dc} = \frac{1}{(1-\alpha)} \times V_{pv} \quad (2.2)$$

$$I_{dc} = (1 - \alpha) \times I_L \quad (2.3)$$

II.3.4 Modélisation du convertisseur Buck-boost :

Un convertisseur Buck, ou hacheur série convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

$$V_s = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} \times V_e \quad (2.4)$$

II.3.5 Modélisation du convertisseur DC/AC (Onduleur) :

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant produit par générateur photovoltaïque, en courant alternatif monophasé ou triphasé.

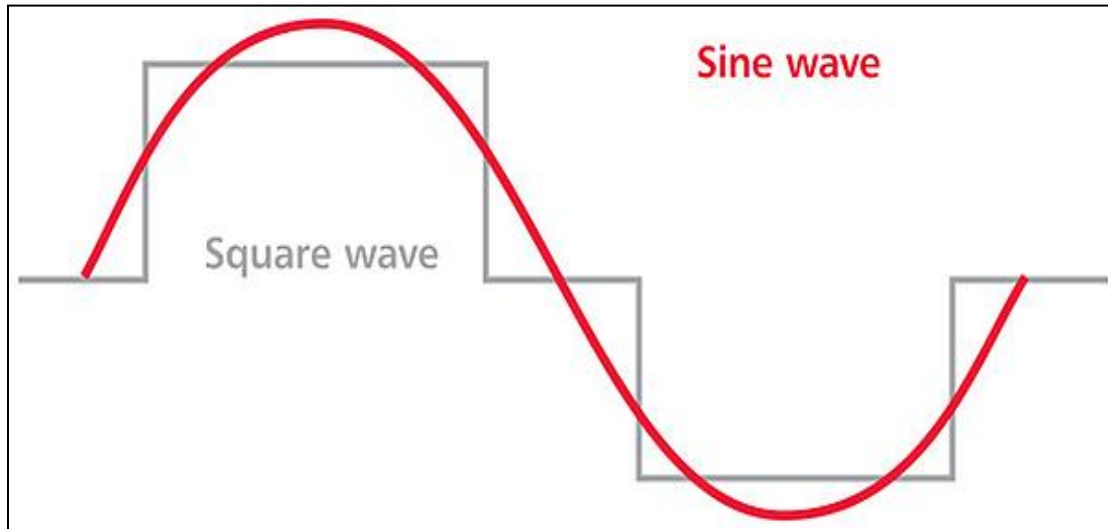


Figure II.4 : fonction principale de l'onduleur [18]

Dans cette étude on considère le cas idéal d'un onduleur triphasé à deux niveaux de tension qui est représenté par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée. L'onduleur considéré comme une source de tension parfaite présente une impédance Interne négligeable. [19]

Le schéma de cet onduleur est donné dans la figure :

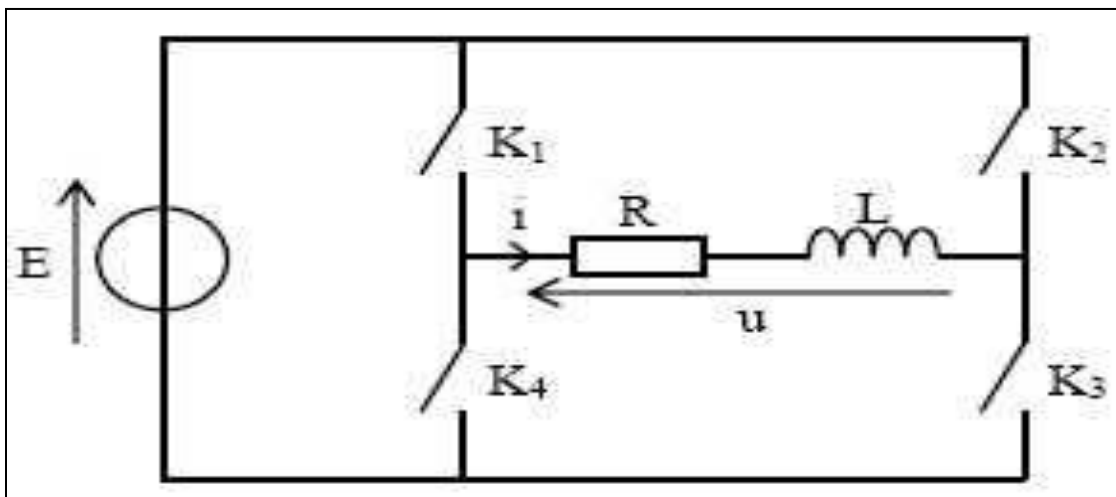


Figure II.5 : Circuit de l'onduleur [20]

Les tensions composées V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} sont obtenues à partir de ces relations : [19]

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{a0} + V_{0b} = V_{a0} - V_{b0} \\ V_{bc} &= V_{b0} + V_{0c} = V_{b0} - V_{c0} \\ V_{ca} &= V_{c0} + V_{0a} = V_{c0} - V_{a0} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Avec : V_{a0} , V_{b0} , V_{c0} sont les tensions à l'entrée de l'onduleur (continues). On a pris le point « O » comme référence pour ces dernières tensions. Les trois tensions à l'entrée continues sont données par la relation de CHARLE comme suit : [19]

$$\begin{pmatrix} V_{a0} = V_{an} - V_{n0} \\ V_{b0} = V_{bn} - V_{n0} \\ V_{c0} = V_{cn} - V_{n0} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Avec : V_{an} , V_{bn} , V_{cn} sont les tensions de phase de la charge, ou de sortie de l'onduleur et V_{n0} est la tension du neutre de la charge par rapport au point « O ». On suppose que la charge est équilibrée :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (2.7)$$

En remplaçant (II.7) dans (II.6) on aura :

$$V_{n0} = \frac{1}{3} (V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \quad (2.8)$$

En remplaçant (II.8) dans (II.5) on aura :

$$\begin{pmatrix} V_{an} = \frac{1}{3} (2V_{a0} - V_{b0} - V_{c0}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3} (2V_{b0} - V_{a0} - V_{c0}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3} (2V_{c0} - V_{a0} - V_{b0}) \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Si on suppose que :

$$\begin{pmatrix} V_{a0} = V_{dc} \times S_1 \\ V_{b0} = V_{dc} \times S_2 \\ V_{c0} = V_{dc} \times S_3 \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

(S_i) est l'état de l'interrupteur (K_i) tel que :

$$S_i = 1 \quad K_i \text{ Fermé} \quad (17) \quad S_i = 0 \quad K_i \text{ Ouvert}$$

Donc :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \frac{u_0}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

II.3.6 Modélisation de la pompe :

II.3.6.1 Le pompage solaire :

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

II.3.6.1.1 Pompage « au fil du soleil » :

Le pompage « au fil du soleil » permet d'avoir un système photovoltaïque simple, fiable et moins coûteux. Ici l'eau est pompée et stockée dans un réservoir, au fil de la journée. On parle alors d'un stockage hydraulique. L'eau stockée sera distribuée au besoin. [21]

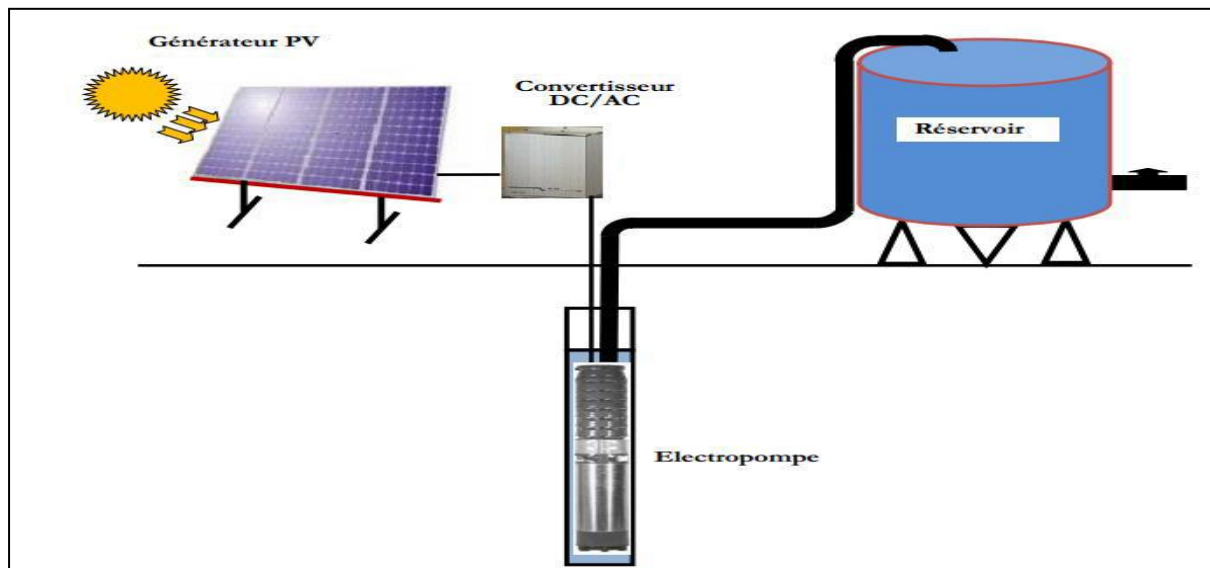


Figure II.6 : Pompage photovoltaïque au fil du soleil. [21]

II.3.6.1.2 Pompage avec stockage d'énergie :

Ici c'est l'énergie électrique qui sera stockée dans des batteries. Le pompage sera possible même en absence du soleil. Un tel système est plus coûteux que le précédent, vu la nécessité de changer les batteries, car elles ont une courte durée de vie. [22]

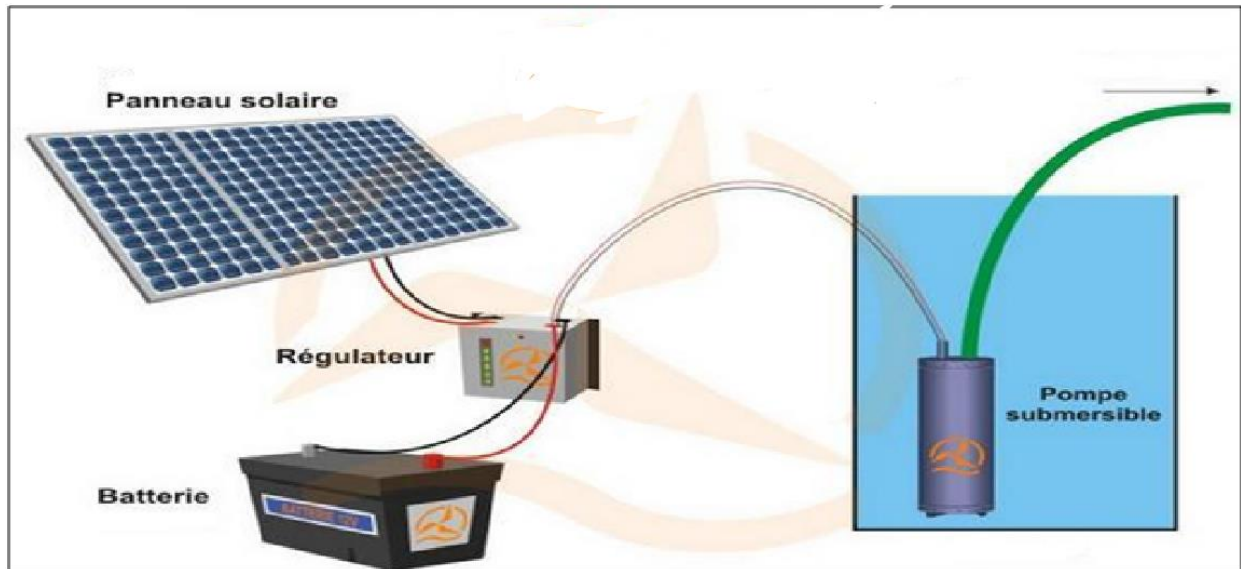


Figure II.7 : Pompage photovoltaïque avec stockage d'énergie. [22]

II.3.6.2 Le groupe de motopompe :

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.[23]

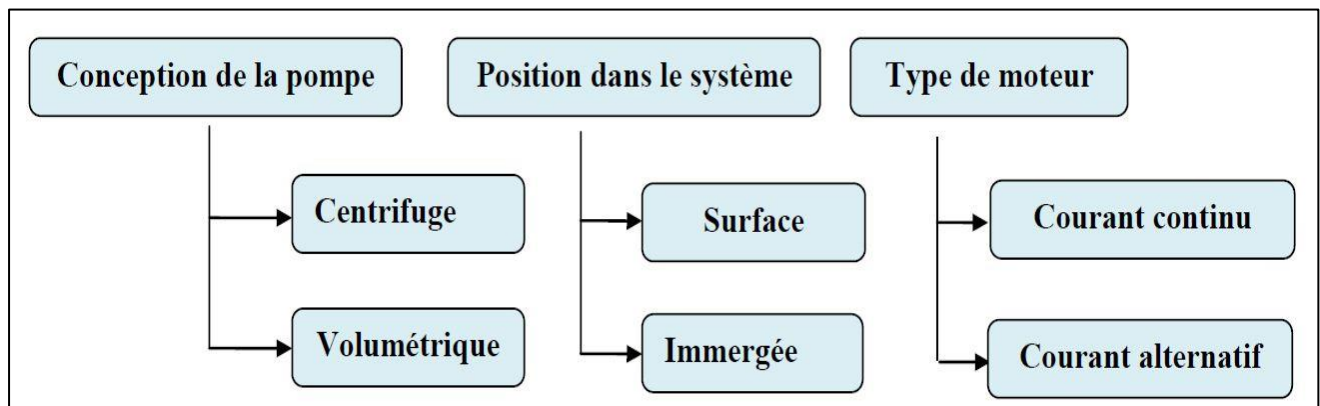


Figure II.8 : Classification des pompes [23]

II.3.6.2.1 Classification selon la conception de la pompe :

Une pompe est un dispositif permettant d'aspirer et de refouler un fluide. Il existe deux types de pompes : les pompes centrifuges et les pompes volumétrique.

a) Pompe centrifuge :

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou à ailettes. L'eau qui rente au centre de la pompe sera poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages.

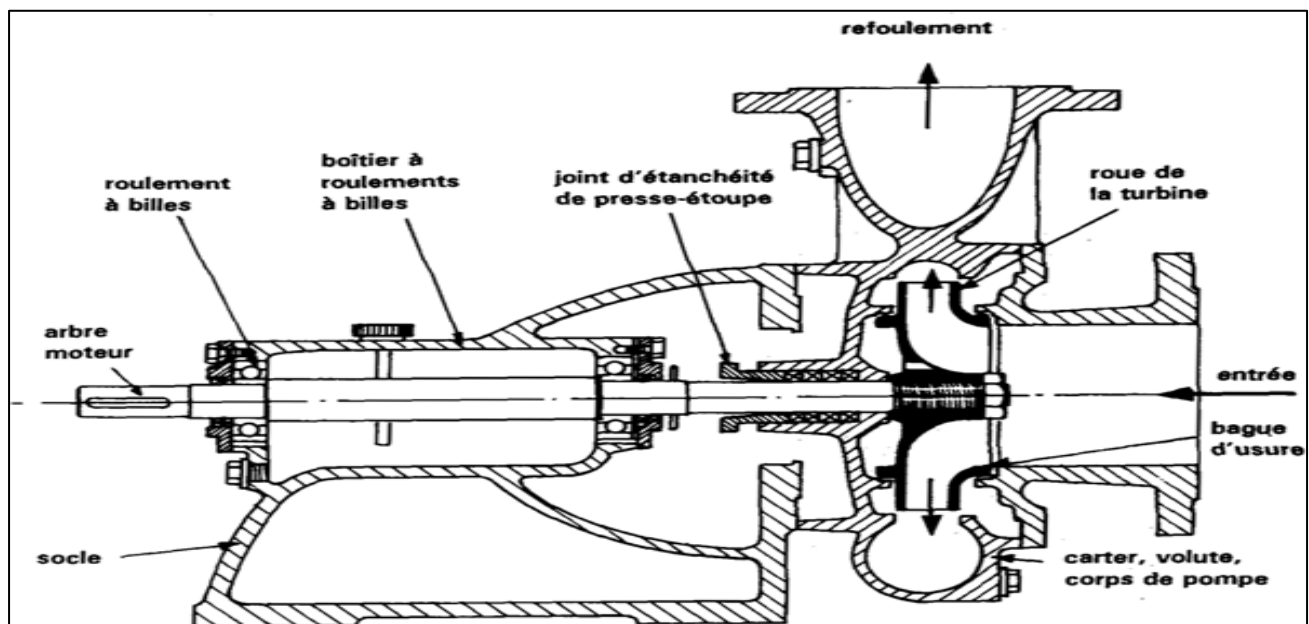


Figure II.9 : Schéma d'une pompe centrifuge [24]

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu trois paramètres, la hauteur manométrique, le débit et la vitesse. La hauteur de pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique [25].

Dans cette application, la puissance hydraulique de la pompe centrifuge est donnée par :

$$P_h = R_{mp} \times P_{ele} = \rho \times G \times HMT \times Q \quad (2.12)$$

Avec :

P_h : Puissance communiquée au fluide par la pompe (W)

P_{ele} : Puissance électrique du moteur asynchrone (W)

R_{mp} : Rendement du groupe motopompe (%)

G : Accélération de la pesanteur (9.81 m/s^2)

ρ : Masse volumique de l'eau (1000 Kg/m^3)

Q : Débit volumique (m^3/s);

HMT : Hauteur manométrique totale que doit convaincre la pompe (m)

b) Pompe volumétrique :

La pompe volumétrique 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. Une pompe volumétrique comporte toujours une pièce mobile dans une pièce creuse qui déplace le liquide en variant le volume contenu dans la pièce creuse.

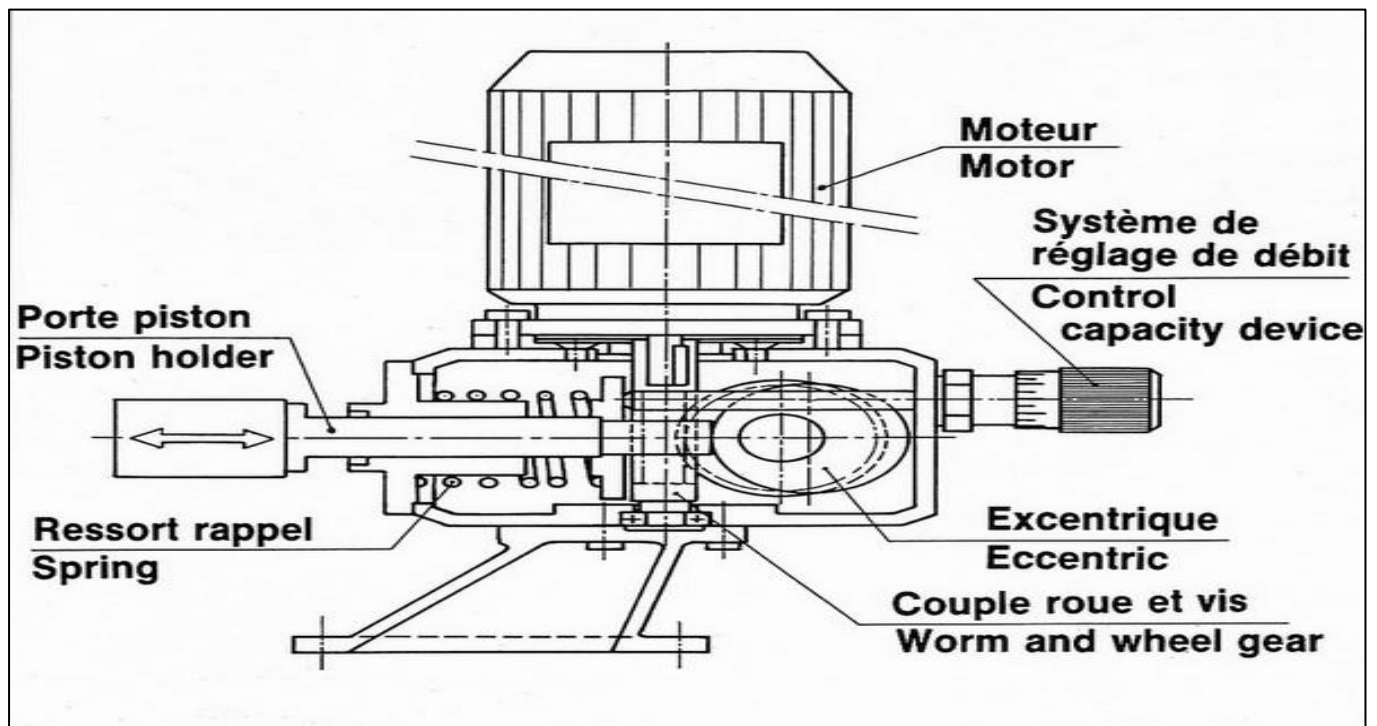


Figure II.10 : Schéma d'une pompe volumétrique. [26]

II.3.6.2.2 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.[21]

a) Pompes de surface :

Le terme surface définit la position d'une pompe par rapport au liquide à pomper. Elle est dite pompe de surface, car prévue pour être posée en dehors du liquide à aspirer.

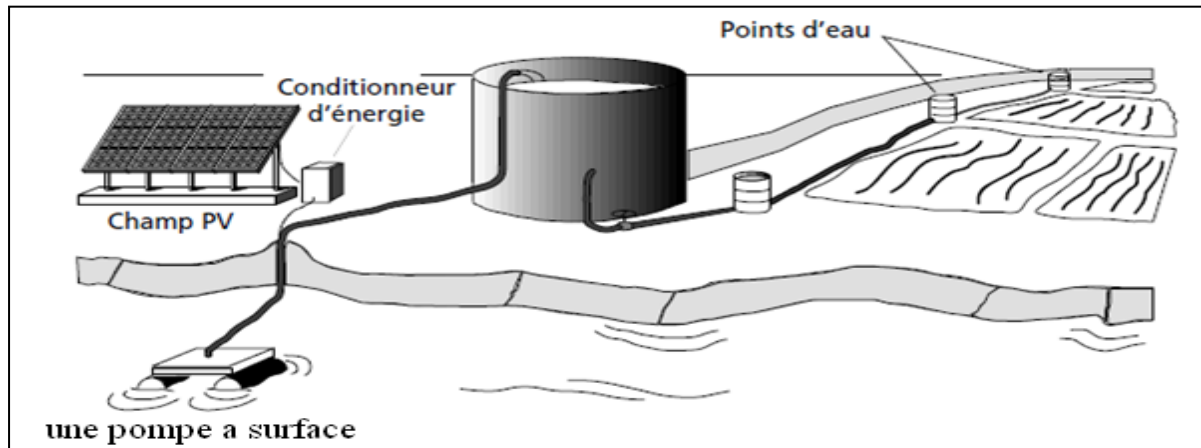


Figure II.11 : Pompes de surface. [21]

b) 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.

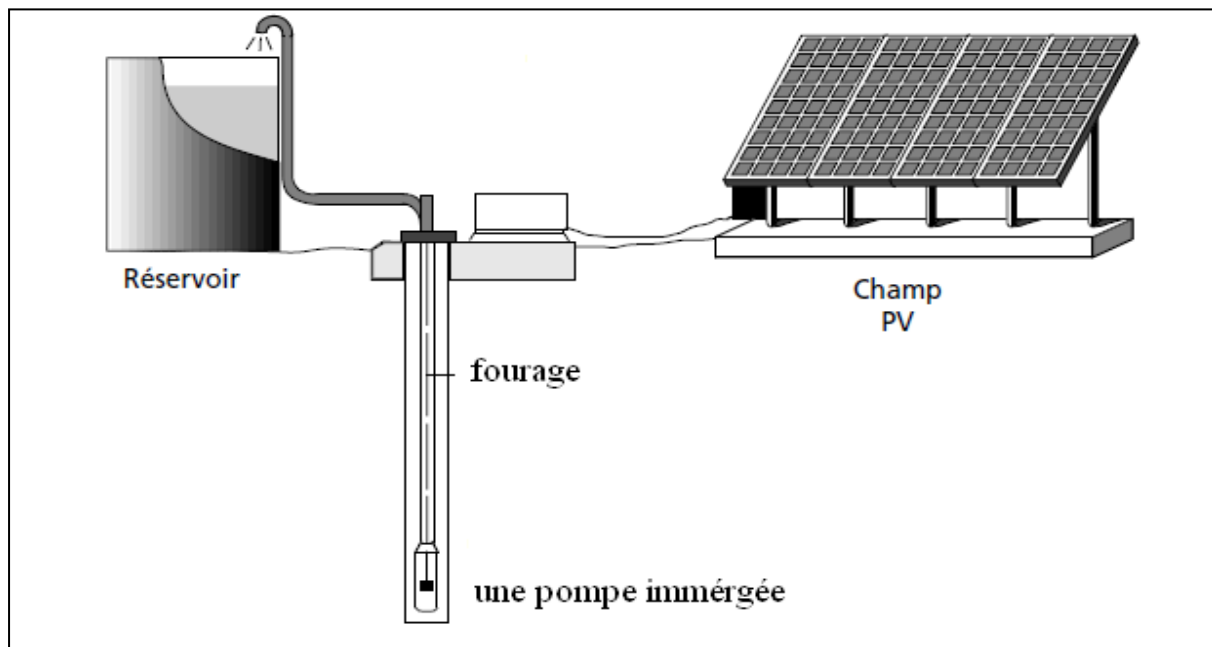


Figure II.12 : Pompe immergée [21]

II.3.6.2.3 Classification selon le moteur utilisé :

Un moteur électrique est un dispositif électromécanique permettant la conversion l'énergie électrique en énergie mécanique. Il existe deux types de moteurs : à courant continu et alternatif [22]

a) Moteur à courant continu

L'énergie électrique appliquée à un moteur est transformée en énergie mécanique en variant le sens du courant circulant dans un induct (habituellement le rotor) soumis à un champ magnétique produit par un inducteur (habituellement le stator). [22]

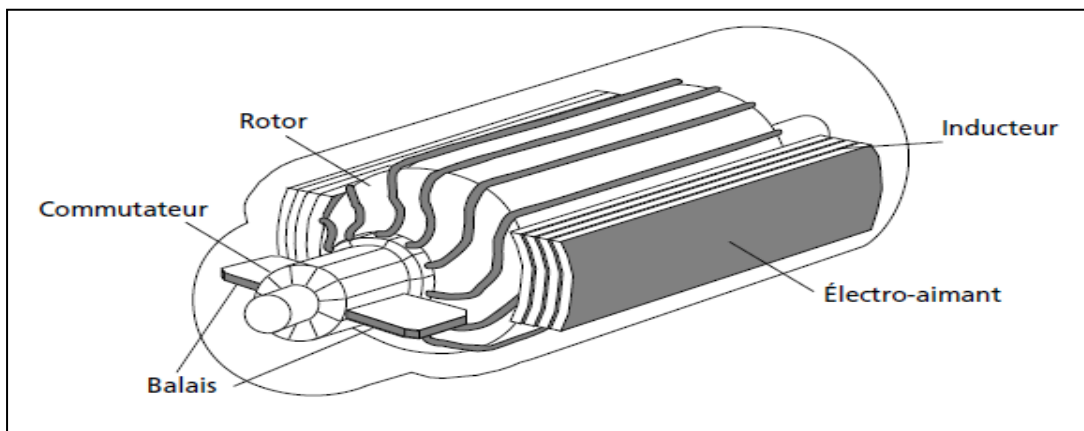


Figure II.13 : Moteur à courant continu avec balais. [22]

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

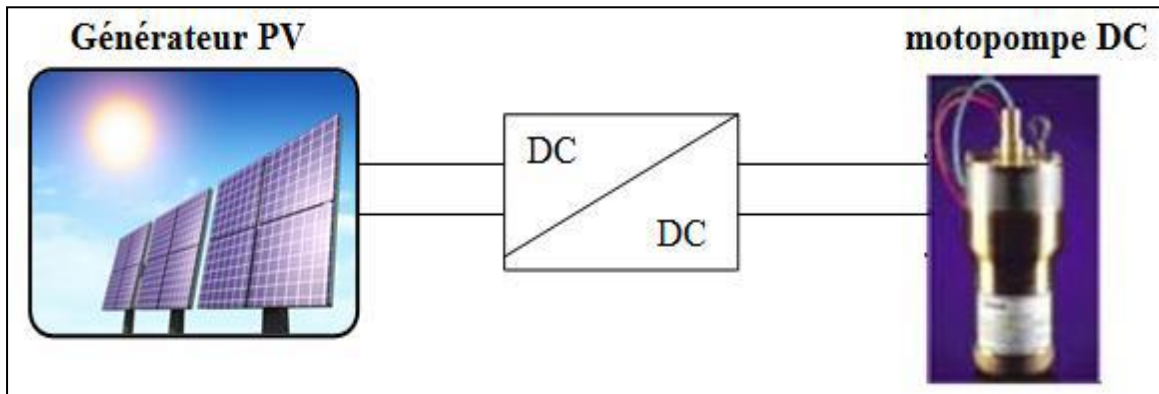


Figure II.14: Schéma synoptique simplifié du pompage PV par motopompe DC. [22]

b) Moteur à courant alternatif :

L'utilisation du moteur à courant alternatif pour les applications de pompage photovoltaïques est de plus en plus croissante puisque le coût peu élevé du moteur, son faible besoin de maintenance et l'efficacité accrue des onduleurs solaires le rendent particulièrement attrayant pour ce type de système. De dimension compacte, il est utilisé particulièrement pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts. De plus, l'utilisation d'onduleurs efficaces permet un contrôle de la vitesse du moteur et ce dernier point est recommandé pour des applications de pompage solaire.[22]

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

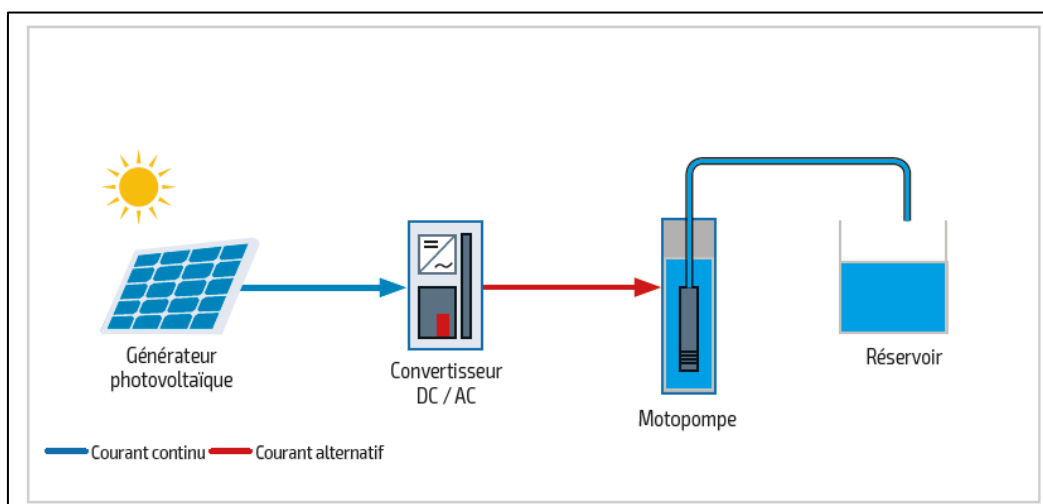


Figure II.15 : Schéma synoptique simplifié du pompage PV par motopompe à AC. [22]

II.3.7 Le modèle électrique de la batterie :

Le modèle électrique de la batterie comprend une fem. E_0 modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie (C_b) et une résistance interne (R_s).

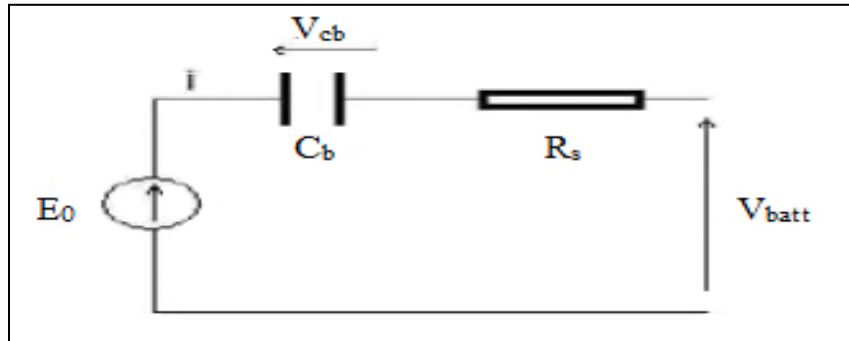


Figure II.16 : Modèle R-C de la batterie. [15]

Nous avons donc :

$$V_{batt} = E_0 - R_s i - V_{cb} \quad (2.13)$$

On définit également l'état de charge (E_{DC}) de la batterie par :

$$E_{DC} = \frac{1 - Q_d}{C_{batt}} \quad (2.14)$$

C_{batt} : la capacité (Ah) nominale de la batterie.

Q_d : la quantité de charge manquante par rapport à C_{batt} .

II.4 Rendement d'un système de pompage photovoltaïque :

Le rendement d'un système de pompage photovoltaïque ne dépasse pas 3% en 1981, s'est amélioré au fil des années pour atteindre une valeur de 5% [27]. Indépendamment de la configuration choisie, le volume d'eau pompée dépendra toujours de cinq facteurs, qui sont les suivants :

- Le niveau de l'ensoleillement,
- La température,
- Le rendement du générateur photovoltaïque,
- La surface du générateur photovoltaïque,
- Les caractéristiques du système hydraulique (moteur-pompe).

La pompe peut être caractérisée par les équations suivantes : [28]

$$P_p = 2.725 \times Q \times HMT \quad (2.15)$$

$$\eta_p = \frac{P_p}{P_{mec}} \quad (2.16)$$

Avec :

P_p : la puissance hydraulique en W

Q : le débit en m³/h

HMT : la hauteur manométrique en m

P_{mec} : la puissance mécanique

η_p : le rendement de la pompe

Le rendement du moteur électrique est le suivant :

$$\eta_m = \frac{P_{mec}}{P_e} \quad (2.17)$$

Avec P_e représente la puissance électrique fournie au moteur.

Le rendement du convertisseur statique est défini par l'équation suivante :

$$\eta_c = \frac{P_e}{P_{dc}} \quad (2.18)$$

Avec P_{dc} représente la puissance fournie par le générateur photovoltaïque.

Le rendement du générateur photovoltaïque est le suivant :

$$\eta_{pv} = \frac{P_{dc}}{A \times G} \quad (2.19)$$

Avec A représenté la surface du générateur m_2 et G représente l'ensoleillement en W/m²

Le rendement global du système de pompage photovoltaïque est égal au produit des rendements de chaque composant : pompe, moteur, convertisseur statique et générateur photovoltaïque, qui, tous, évoluent au cours de la journée.

$$\eta_G = \eta_{pv} \times \eta_c \times \eta_m \times \eta_p \quad (2.20)$$

II.5 Les pertes de charge :

Les pertes de charge correspondent à l'énergie dissipée par frottement, changement de direction et variation de vitesse du liquide à l'intérieur de la tuyauterie et des accessoires.

Ces pertes généralement dépendent des éléments suivants :[29]

- Elles sont directement proportionnelles à la longueur de la canalisation puisqu'elles augmentent quand la longueur de canalisation augmente.
- Quand le diamètre diminue, les pertes de charge augmentent considérablement. Le liquide a plus de difficultés à s'écouler donc les frottements augmentent pour un débit identique.
- Plus le débit augmente, plus les forces de frottements augmentent pour un diamètre identique.

a) Pertes de charge linéaires :

Ces pertes se produisent tout le long d'une canalisation. Elles sont données par la formule générale suivante : [29]

$$j = \lambda \left[\frac{L \times V^2}{D \times 2g} \right] \quad (2.21)$$

Avec L est longueur de la canalisation, D est le diamètre de la canalisation et λ est le coefficient qui dépend de la rugosité des parois et de la viscosité du liquide. Elles sont données en mètres de perte de charge par mètre de canalisation dans des tableaux ou abaques prenant en compte les matériaux, le diamètre et le débit

b) Pertes de charge singulières :

Elles sont essentiellement dues aux accidents de parcours dans les réseaux hydrauliques (tés, coudés, vannes, élargissement ou rétrécissement de tuyauterie, etc.) et sont exprimées par la relation suivante :[29]

$$j = k \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (2.22)$$

Avec k représente le coefficient caractéristique de la singularité. Ces pertes, de charge sont données par le constructeur et exprimées soit directement en mètres de colonne d'eau en fonction du débit et de la singularité.

Par conséquent, la hauteur manométrique est égale à la somme des hauteurs géométriques d'aspiration et de refoulement (h_a, h_r), des pertes de charge dans les conduites (J_a, J_r), et des pressions dans les bassins d'alimentation et de refoulement (P_1, P_2) converties en mètres d'eau.

La hauteur manométrique correspondante se calcul selon la relation suivante :

$$H = h_a + h_r + j_a + j_r + (p_2 - p_1) \times 10.2 \quad (2.23)$$

Conclusion :

Dans ce chapitre, on s'est intéressé à la modélisation des différents éléments du système de pompage photovoltaïque (panneau photovoltaïque, convertisseur DC/DC et DC/AC et le groupe motopompe). Nous avons présenté aussi les caractéristiques courant/tension et puissance/tension du module photovoltaïque.

Chapitre III

Dimensionnement et gestion de l'énergie
du système de pompage photovoltaïque

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. Ce phénomène a fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des générateurs photovoltaïques comme nouvelle source d'énergie. La réalisation d'un système de pompage photovoltaïque autonome, fiable et à bon rendement, constitue une solution pratique et économique au problème du manque d'eau, en particulier dans les régions désertiques. En effet, un système photovoltaïque devient intéressant lorsqu'il est facile à installer avec une autonomie acceptable et une excellente fiabilité de service. Dans ce chapitre on traite plus particulièrement les éléments nécessaires qui consistent une station de pompage solaire.

III.2 Applications de l'énergie électrique solaire dans le pompage de l'eau :

Les électropompes solaires sont utilisées dans trois applications de base : [30]

- 1- Approvisionnement en eau des villages.
- 2- abreuvement du bétail.
- 3- irrigation des terres agricoles.

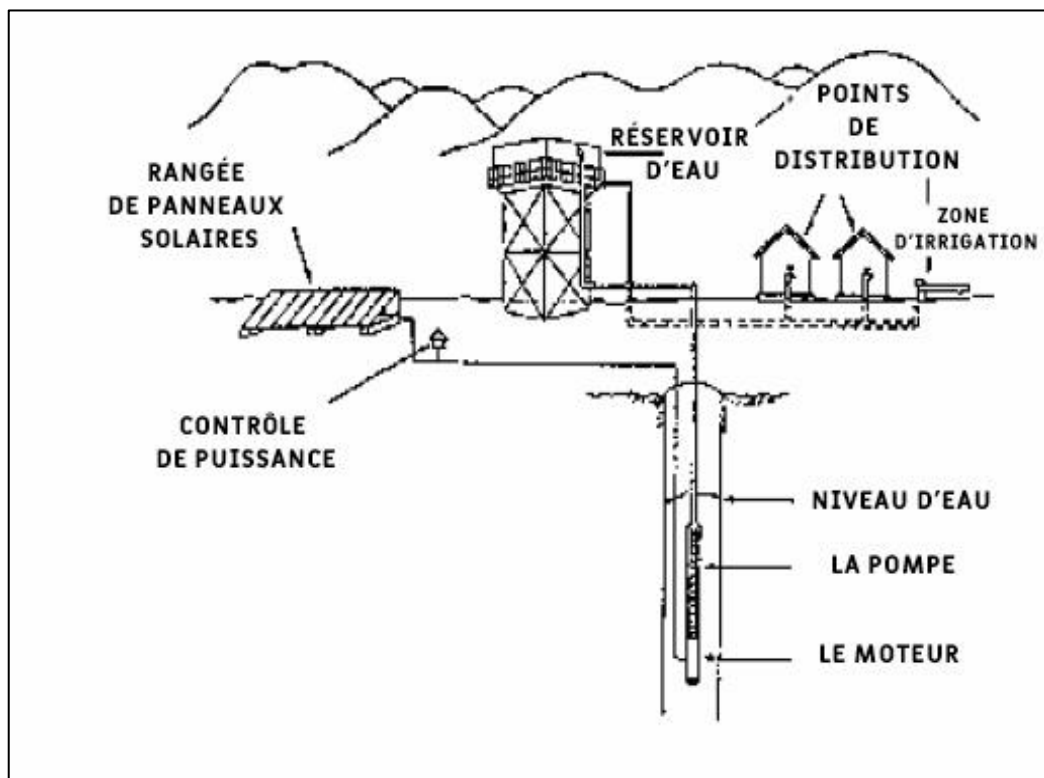


Figure III.1 : Pompe solaire pour alimenter le village en eau [30]

Dans ce cas, la demande en eau est constante tout au long de l'année et les jours nuageux Le rayonnement solaire est trop faible pour stocker l'eau. Et dans les zones caractérisées par les saisons des pluies l'eau de pluie compensera la diminution du travail des pompes solaires durant cette période.

Jusqu'à présent, environ 6000 systèmes de pompage solaire ont été installés dans le monde pour approvisionner les villages en eau ou en eau bétail.

Il doit calculer la valeur du besoin maximal en eau d'irrigation - le système d'irrigation solaire comme indiqué dans la figure il changera au cours de l'année [30]

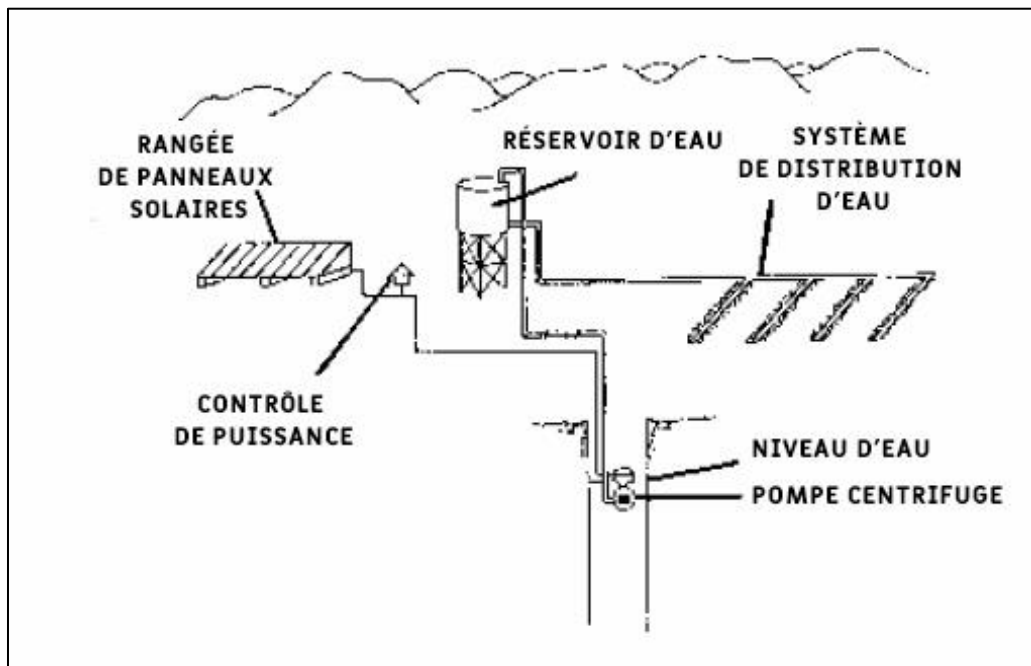


Figure III.2 : Système d'irrigation électro-solaire [30]

Lors de la conception d'un système de pompage, nous devons tenir compte du fait que la plus grande demande d'eau pendant les saisons d'irrigation est souvent deux fois supérieure à la demande moyenne en eau, ce qui signifie que les pompes solaires utilisées pour l'irrigation seront insuffisantes ; Par conséquent, une attention particulière doit être portée au système de distribution et à la distribution d'eau aux cultures. Le système de distribution devrait réduire les pertes en eau sans surcharger le système de pompage, et cela peut être fait à faible coût.

En général, il existe un accord entre l'augmentation du rayonnement solaire en été et l'augmentation de la demande en eau.

Tableau III.1 : Les principaux systèmes d'irrigation conviennent à l'utilisation de pompes solaires [30]

| Comment utiliser | Rendement parfait | Hauteur parfaite | Pratique pour utiliser des pompes solaires |
|------------------|-------------------|------------------|--|
| Chaînes ouvertes | 50 – 60 % | 0.5 – 1 m | Oui |
| Vaporisateur | 70 % | 10 – 20 m | Non |
| Goutte | 85 % | 1 – 2 m | Oui |
| Immersion | 40 – 50 % | 0.5 m | Non |

III.2.1 Composants du système de pompage électrique solaire :

Le système de pompage électro-solaire se compose des éléments principaux suivants :

- 1- Matrice de panneaux solaires et accessoires.
- 2- L'ensemble moteur et pompe comprend les pièces qui convertissent la sortie électrique de la matrice de plaque énergie électro-solaire à hydraulique.
- 3- Le réservoir et le système de distribution qui conduisent l'eau jusqu'au point d'utilisation requis.

Il existe généralement deux types de systèmes de pompage électro-solaire en fonction du courant électrique utilisé :

- Système de pompage électro-solaire alternatif (AC)
- Système de pompage électro-solaire en continu (CC) : dans ce type, la pompe peut être connectée directement aux panneaux électro-solaires.

La différence entre les deux systèmes est la présence du méandre dans le système alternatif et cela est dû au type de pompe utilisé.

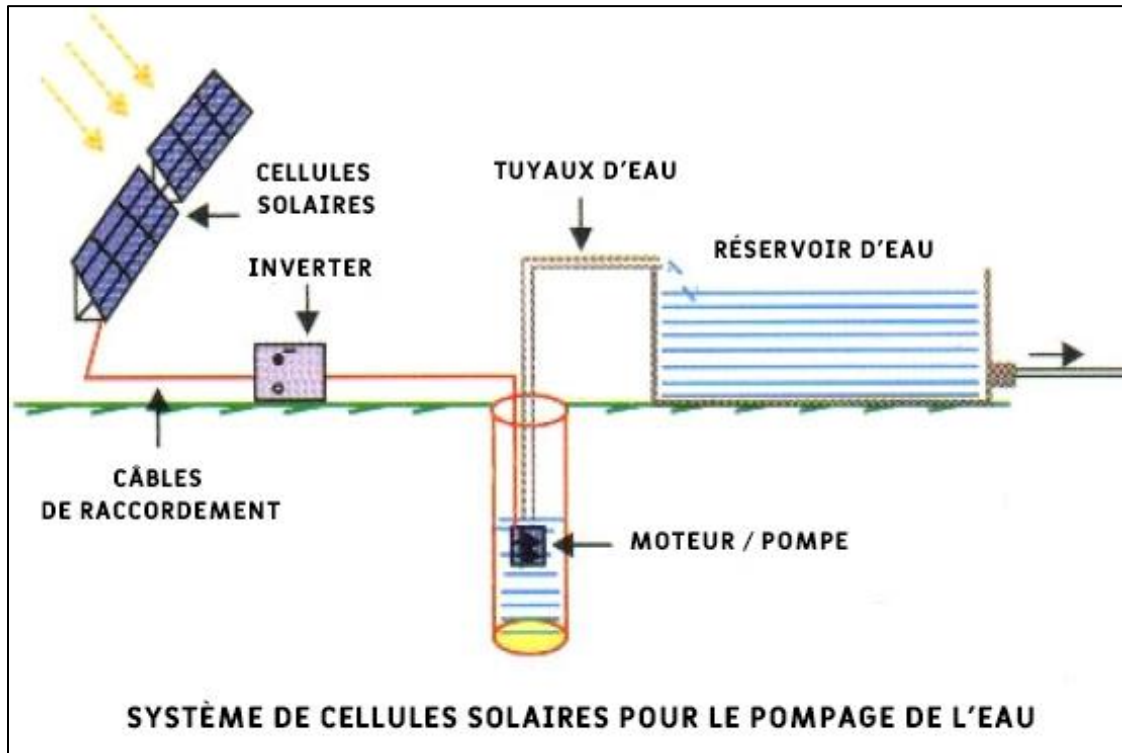


Figure III.3 : Système de pompage électro-solaire alternatif [31]

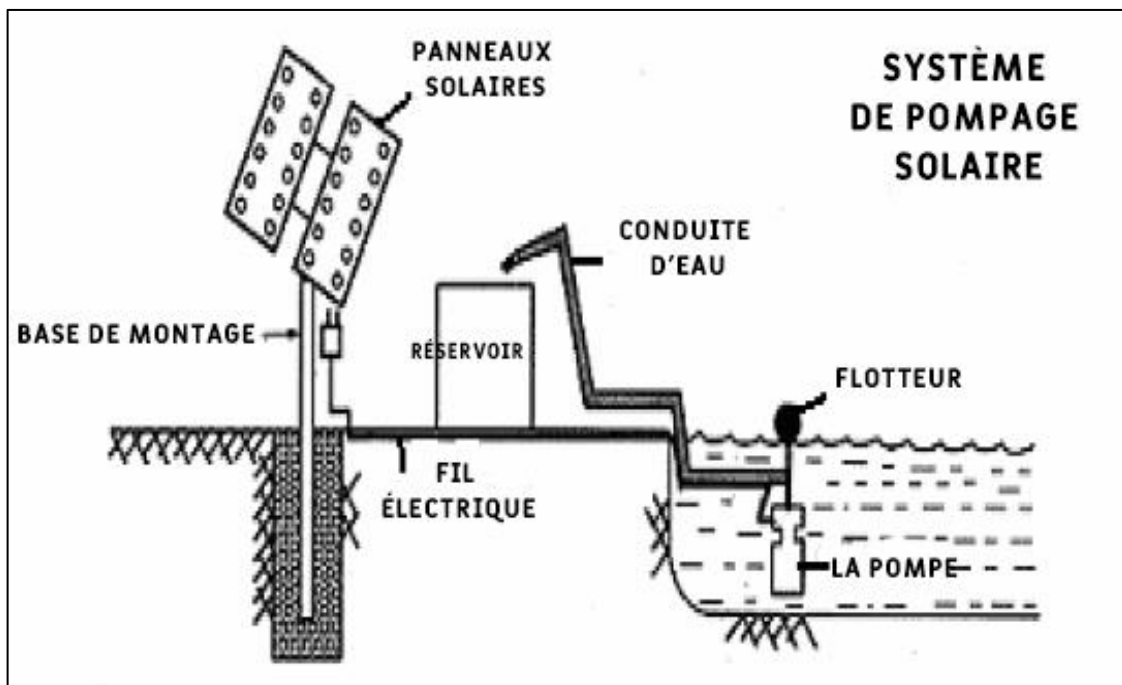


Figure III.4 : Système de pompage électro-solaire en continu [31]

III.3 Méthode de dimensionnement :

L'analyse des besoins et des conditions d'exploitation doit permettre de déterminer la puissance et le type de pompe choisie pour la situation donnée. Ce chapitre permet d'estimer de manière pratique les paramètres qui définiront le système de pompage. Tous les manufacturiers ont leur propre méthode pour bien dimensionner leurs produits.[32] Nous nous limiterons ici à fournir une méthode générale qui permettra de dimensionner théoriquement les éléments d'un système de pompage afin de donner un ordre de grandeur de ces éléments et de comparer les coûts du point de vue réalisation pratique. Il y a trois paramètres techniques qui délimitent l'évaluation d'une pompe solaire. Afin d'obtenir l'évaluation la plus exacte possible, il est essentiel que ces trois paramètres soient estimés le plus précisément possible. Ces trois paramètres sont :

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

III.3.1 Estimation des besoins en eau :

La boisson, la cuisine, la lessive et la toilette constituent les principaux usages de l'eau pour les besoins humains. Les animaux aussi ont besoin d'eau pour leur survie. La demande en eau est également primordiale dans les domaines de l'agriculture et de l'industrie, quelle qu'en soit leur ampleur. [31]

Tableau III.2 : Certaines données sont approximatives pour l'utilisation de l'eau [33]

| Candidature | Consommation approximative |
|--------------------|--|
| Famille | (190) litres par jour, par personne, en moyenne |
| Bétail et chevaux | (38 – 57) litres par jour et par tête |
| Vaches laitières | (76 – 114) litres par jour et par tête |
| Ovins et caprins | (7.6) litres par jour et par tête |
| Petits animaux | (0.96) litre par jour et par (11) kg de poids corporel |
| Oiseaux – volaille | (23 – 45.6) litres par jour Pour chaque (100) oiseaux |
| Petits arbres | (57) litres par jour par temps sec |

III.4 Détermine la source d'eau :

La détermination du système d'irrigation est largement liée au type et à l'emplacement de la source d'eau par rapport à l'endroit que nous voulons

Nous l'approvisionnons en eau, car la source d'eau sera profonde (puits) ou de surface (étang, ruisseau), et les puits sont préférés en raison de la bonne qualité et fiabilité de l'eau.

Dans tous les cas, les puits sont coûteux en raison du forage, surtout lorsque l'eau est profonde et que les sources d'eau de surface peuvent varier selon les saisons, car la quantité et la qualité de l'eau sont faibles pendant l'été lorsque la demande en est plus.

Pour les puits, les besoins suivants doivent être connus et définis :

- Niveau d'eau statique.
- Variations saisonnières de la profondeur.
- Rapport de compensation de l'eau.
- La qualité d'eau.

Si le puits est nouveau en forage, cette information est tirée du puits de forage, tout comme la qualité de l'eau Pas important s'il n'est pas utilisé pour la consommation humaine.

Quant aux eaux de surface, les besoins suivants doivent également être connus et définis :

- Changements saisonniers.
- Qualité de l'eau, y compris la présence d'argile, de résidus organiques, etc.

Le système d'alimentation en eau doit d'abord être planifié pour déterminer l'emplacement de la source d'eau et les points requis

Pour la distribution, le graphique doit également avoir des points d'élévation afin que nous puissions calculer la différence de la hauteur.

La figure montre un modèle de ferme et utilise un approvisionnement en eau de faible largeur comme source d'eau et réservoir

Ils ont fusionné ensemble et se sont situés sur la colline, auquel cas l'eau sous l'influence de la gravité peut être distribuée aux endroits d'alimentation [34]



Figure III.5 : Un modèle de ferme dans laquelle l'eau est distribué sous l'influence de la gravité

[35]

III.5 Commodité de l'emplacement de la source d'eau solaire :

L'emplacement de la source d'eau doit être approprié pour installer le système de pompage d'eau solaire utilisé.

Lors de l'installation d'un système de pompage d'eau solaire, les informations suivantes doivent être connues :

- Les panneaux solaires doivent être orientés vers le sud dans l'hémisphère nord le sol sans ombre pendant toute la journée.
- Les sites doivent être prêts à installer la pompe à eau, le réservoir et les autres dispositifs du système.
- La rangée de panneaux solaires doit être proche du site de la pompe pour réduire la longueur et le coût du fil composition.
- Si les économies sont utilisées, elles doivent être sèches et placées au bon endroit.
- Si de l'eau est requise tout au long de l'année, la question du gel de l'eau doit être étudiée surtout dans les zones où la température descend en dessous de zéro, et cela des résistances thermiques d'hiver sont nécessaires. Les régions si chaudes sont mes préférées pour réserve d'eau [32]

De plus, vous devez connaître les données sur les utilisations solaires régionales attendues. Ces sources nous fournissent le nombre d'heures de la journée où le rayonnement solaire est complet en été et en hiver.

III.6 Dimensionnement du réservoir :

Tous les systèmes de pompage d'eau solaire utilisent un réservoir d'eau, dont la raison est de stocker l'eau au lieu de stocker l'électricité dans les batteries, réduisant ainsi le coût et la complexité du système.

La méthode expérimentale générale pour déterminer la taille du réservoir pour être au moins suffisante pour trois à cinq jours d'eau [34]

Et la méthode la plus courante pour stocker l'eau est un réservoir en plastique adapté à la nourriture comme indiqué dans le formulaire et est souvent placé à un point haut de la terre pour profiter de la gravité pour atteindre l'eau pour les applications Utilisé pour l'irrigation comme la goutte à goutte et autres.



Figure III.6 : Où le réservoir d'eau est situé dans l'irrigation [31]

La pompe est contrôlée par une vanne de débit qui est installée à l'intérieur du réservoir en fonction du niveau de la surface de l'eau comme indiqué sur la figure :

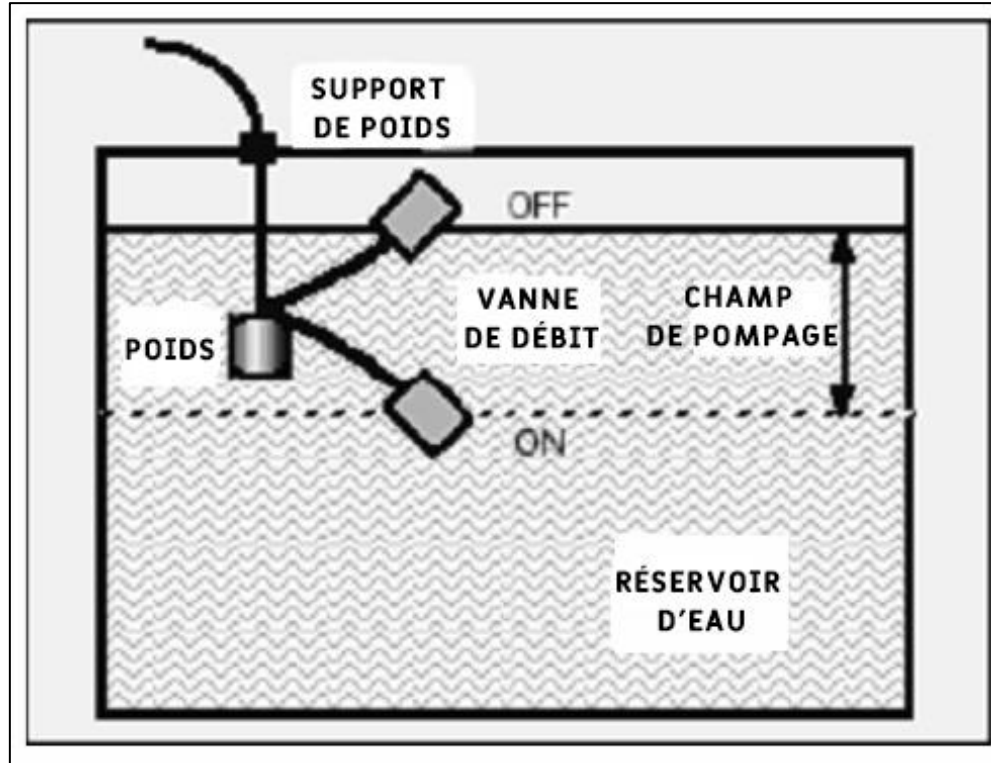


Figure III.7 : Commande de pompe par soupape de débit [31]

III.7 Dimensionnement du groupe motopompe :

III.7.1 Pompe

Caractéristiques générales :

Pour caractériser une pompe, on s'appuie sur trois courbes caractéristiques. Dans le cadre des pompes et du pompage, il est d'usage, par convention et par commodité, d'exprimer la quantité transportée et la distance du déplacement au moyen de deux paramètres.

III.7.2 Donnée de base :

Le débit d'eau de la pompe et la hauteur manométrique de pompage sont des données nécessaires pour le dimensionnement de la pompe et de ses composants. [35,36]

III.7.3 Le débit :

Le débit (Q) est la quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné. En pompage, le débit est habituellement donné en litres par heure (l/h) ou gallons par heure (gph). En pompage solaire, le débit (ou le besoin en eau) est souvent exprimé en m^3 par jour. [36]

III.7.4 La hauteur manométrique totale :

La HMT est la différence de pression en mètre de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement. Elle peut être calculée comme suit :

$$HMT = H_g + P_c \quad (3.1)$$

Avec :

H_g : Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée et le plan d'utilisation.

P_c : Pertes de charge produites par le frottement d'eau sur les parois des conduites. Ces pertes sont en fonction de la distance des conduites (L), de leur diamètre (d_c) et du débit de la pompe (Q) et s'expriment en mètre de colonne d'eau. Le diamètre des conduites (d_c) doit être calculé afin que les pertes de charge p_c correspondent au plus à 10% de la HMT.

Caractéristique de la pompe :

Selon l'équation de Bernoulli, on peut écrire :

$$P_{refoul} - P_{asp} = \rho g H_{MT} - \Delta P_{ch} \quad (3.2)$$

$$P_{refoul} - P_{asp} = \rho g H_{MT} \quad (3.3)$$

Alors la hauteur manométrique totale décroît avec le débit, du fait des pertes par frottements dans la pompe. La courbe donnant cette hauteur manométrique totale en fonction du débit est appelée « Caractéristique de la pompe ».

$$H_{MT} = \Delta H_{pompe} = \frac{\Delta P_{pompe}}{\rho g} \quad (3.4)$$

Avec ΔH_{pompe} : la pression différentielle de la pompe

$$H_{MT} = H_G + \Delta H \longrightarrow \text{Pompe en aspiration} \quad (3.5)$$

$$H_{MT} = H_G + \Delta H - H_c \longrightarrow \text{Pompe en charge} \quad (3.6)$$

ΔH : Pertes de charge

H_G : hauteur en aspiration pour une pompe montée en charge

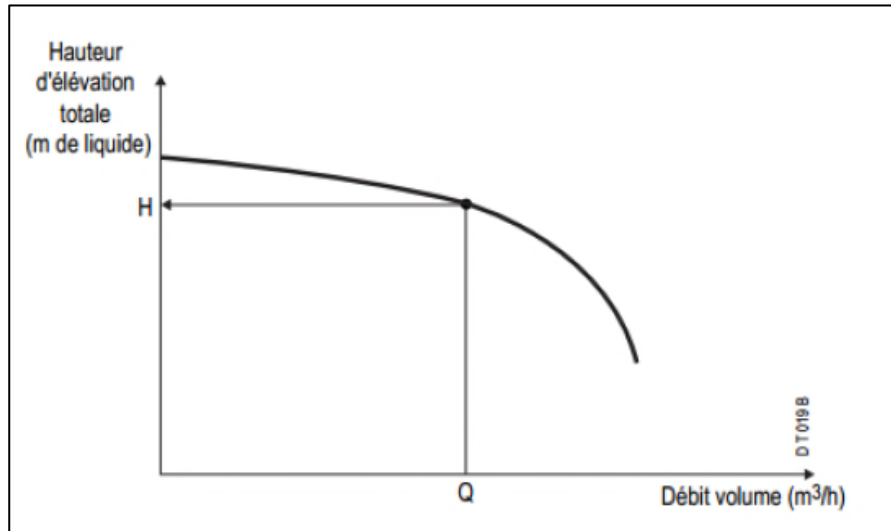


Figure III.8 : caractéristique H-Q d'une pompe centrifuge [37]

Caractéristique du rendement :

Le rendement η_p d'une pompe est le rapport de la puissance utile P_{hydro} (puissance hydraulique) communiquée au liquide pompé à la puissance absorbée P_m par la pompe (en bout d'arbre ou par le groupe (aux bornes du moteur)). Si Q est le débit volume du fluide, ρ sa masse volumique et H_{MT} la hauteur manométrique de la pompe, la puissance P_{hyd} et le rendement η_p sont donnés par :

$$\eta_p = \frac{P_{\text{hydro}}}{P_m} \quad (3.7)$$

P_{hydro} : Puissance fournie au fluide donné par :

$$P_{\text{hydro}} = \rho g H_{MT} Q = Q \Delta H_{\text{pompe}} \quad (3.8)$$

P_m : Puissance absorbé par la pompe

Puisque la hauteur manométrique décroît avec le débit Q , la courbe (η_p, Q) présente un maximum, donc le rendement de la pompe varie avec le débit et passe par un maximum pour le débit nominal autour duquel la pompe doit être utilisée.

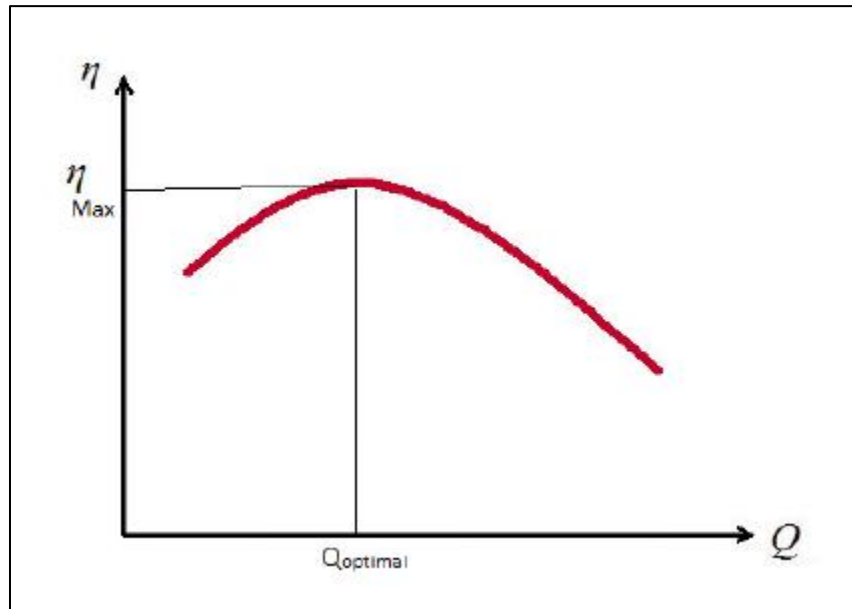


Figure III.9 : caractéristique Q d'une pompe centrifuge [37]

Caractéristique du NPSH (« Net Positive Section Head ») :

Si on appelle « s » la dépression locale maximale qui peut avoir lieu dans la pompe.
 Pour éviter le phénomène de la cavitation, il faut que la pression à l'aspiration soit telle que :

$$P_{\text{asp}} - s > P_{\text{vap}} \quad (3.9)$$

P_{asp} : Pression à l'aspiration

P_{vap} : Pression de vapeur saturante à la température considérée

La cavitation est un phénomène à éviter absolument, car il entraîne de graves conséquences érosion du matériau pouvant aller jusqu'au perçage des aubes de turbine des pompes centrifuges augmentation du bruit et des vibrations générés par la pompe chute des performances des pompes avec diminution importante de la hauteur manométrique totale, du débit et du rendement.



Figure III.10 : usure due au phénomène de la cavitation [38]

Pour éviter la cavitation : préférer si possible les montages de pompes en charge.

Eviter de transporter des liquides à des températures trop élevées. Eviter une alimentation à partir d'un réservoir sous pression réduite. Diminuer les pertes de charge du circuit d'aspiration. requis suffisamment faibles.

La pompe ne fonctionnera correctement que si la pression totale à l'entrée PA est supérieure à la somme $P_0 + \text{NPSH requis}$. On appelle « NPSH disponible » la différence entre la pression totale à l'entrée et la pression de vapeur saturante :

$$\text{NPSH}_{\text{disponible}} = P_a - P_0 \quad (3.10)$$

Les conditions d'aspiration sont d'autant meilleures que la différence entre les deux est grande.

Pour qu'une pompe fonctionne normalement (sans cavitation), il faut que le NPSH disponible (calculé) soit supérieur au NPSH requis (indiqué par le constructeur).

$$\text{NPSH}_{\text{disponible}} > \text{NPSH}_{\text{requis}} \quad (3.11)$$

On définit le NPSH comme suit :

$$\text{NPSH} = \frac{P_{\text{asp}}}{\rho g} = \frac{P_{\text{vap}}}{\rho g} \quad (3.12)$$

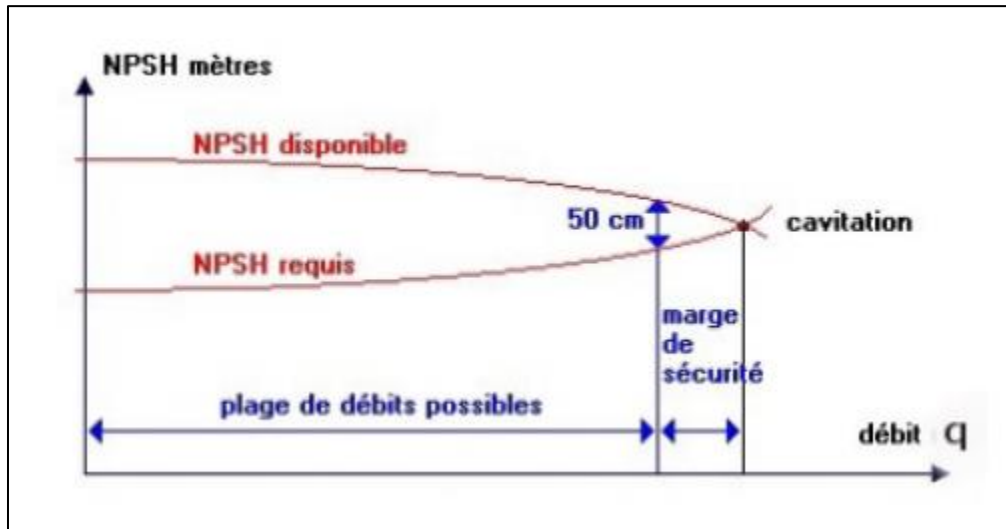


Figure III.11 : caractéristique NPSH-Q d'une pompe centrifuge [37]

III.7.5 Calcul de l'énergie journalière requise :

L'énergie nécessaire pour soulever une certaine quantité d'eau sur une certaine hauteur pendant une journée est calculée à partir des données de débit et de la hauteur manométrique totale requise et s'exprime en watt heure (Wh).

Ce calcul est fonction d'une constante hydraulique (C_H) et est inversement proportionnel au rendement du groupe motopompe utilisé. [39]

Energie requise pour la pompe E_{ele} :

$$E_{ele} = \frac{C_H \times Q \times HMT}{R_{mp}} \quad (3.13)$$

$$\text{Où : } C_H = \frac{g \times \rho}{3600}$$

$$C_H = \frac{9.81 \times 10^3}{3600} = 2.725$$

g : Constante de la gravité (9.81 m/s^2).

ρ : La densité de l'eau (1000 Kg/m^3).

R_{mp} : Rendement du groupe motopompe.

III.7.6 Le point de fonctionnement :

Le point auquel la courbe de la pompe et celle du circuit se croisent est le point de fonctionnement actuel du circuit d'alimentation en eau. Cela signifie qu'à ce point, il y a équilibre entre la génération de puissance de la pompe et la consommation d'énergie requise pour surmonter la résistance dans le système de tuyaux. Cela génère le débit que la pompe peut produire. Il faut faire attention à ne pas dépasser une valeur de débit minimale. Sinon la pompe pourrait surchauffer et être endommagée. Les spécifications du fabricant doivent être respectées. Un point de fonctionnement situé en dehors de la courbe de pompe endommagera le moteur. [40]

Tous les autres points de fonctionnement apparaissant en fonctionnement réel sont situés à gauche de ce point de fonctionnement prévu sur la courbe. Les deux illustrations à droite indiquent que le changement de point de fonctionnement provient du changement de résistance du réseau. Si le point de fonctionnement se décale vers la gauche du 40 point de sélection, la hauteur de refoulement de la pompe augmentera nécessairement. Cela provoque un bruit d'écoulement dans les robinets. L'installation de pompes à débit variable adapte la hauteur de refoulement et le débit à la charge requise. Elle réduit également les coûts de fonctionnement de manière importante.

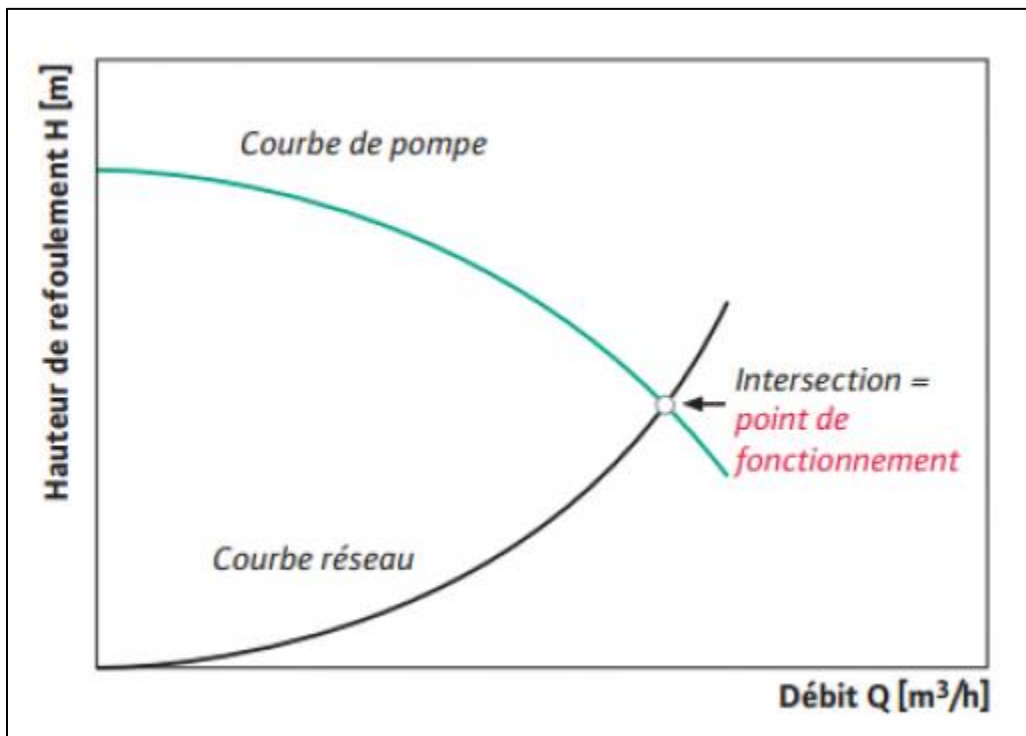


Figure III.12 : caractéristique du point de fonctionnement d'une pompe centrifuge [37]

III.8 Dimensionnement du générateur photovoltaïque :

III.8.1 Détermination de la charge (calcul de l'énergie quotidienne requise) :

L'énergie nécessaire pour soulever une quantité d'eau, sur une certaine hauteur pendant une journée, est calculée à partir des données de débit et de HMT requises. Elle est exprimée en watt heure. Ce calcul est fonction d'une constante hydraulique (CH) et est inversement proportionnel au rendement du groupe motopompe utilisé.

III.8.2 Énergie requise pour la pompe :

Elle est donnée par :

$$E_c = CH \times Q \times \frac{HMT}{R_p} \quad (3.14)$$

E_c est habituellement exprimé en kWh.

Q : Débit (m^3 /jour)

HMT : est la hauteur manométrique totale.

C_H : est la constante hydraulique dépendant de la gravité terrestre et de la densité d'eau

$$C_H = g \cdot \delta = 9.81 \cdot 103 / 3600 = 2,725 \text{ (Kg.s.h/m}^2\text{)}$$

ρ_p : le rendement du groupe motopompe (en général de 30% à 45%)

III.8.3 Calcul du champ photovoltaïque :

L'énergie produite par un champ photovoltaïque est égale à :

$$E_p = \frac{E_c}{k} \quad (3.15)$$

E_c est l'énergie consommée (Wh/jour)

k : un coefficient correcteur dépendant de l'incertitude météorologique, de l'inclinaison des modules solaires et du rendement global du système photovoltaïque. Sa valeur théorique est comprise entre 0.55 et 0.75 mais en pratique la valeur moyenne utilisée est de 0.65

III.8.4 La puissance crête du générateur photovoltaïque :

La puissance crête du générateur photovoltaïque dépend de l'irradiation quotidienne du lieu d'utilisation

$$P_{pv} = \frac{E_p}{I_R} \quad (3.16)$$

I_R : est l'irradiation moyenne journalière, estimée dans notre région à 5.71 kWh/m²/j

III.8.5 Le nombre de modules photovoltaïques :

Le nombre total de modules photovoltaïques est calculé en rapportant la puissance globale du champ à celle P_M d'un seul module :

$$N = \frac{P_{pv}}{P_M} \quad (3.17)$$

Le nombre de modules connectés en série sera :

$$N_S = \frac{V}{V_M} \quad (3.18)$$

Le nombre de branches (modules en parallèle) :

$$N_p = \frac{N}{N_S} \quad (3.19)$$

V et V_M sont respectivement les tensions du système et du module.

III.9 Logiciel PVsyst :

III.9.1 Définition :

PVsyst est conçu pour être utilisé par les architectes, les ingénieurs et les chercheurs, mais c'est aussi un outil pédagogique très utile. Il inclut une aide contextuelle approfondie, qui explique en détail la procédure et les modèles utilisés et offre une approche ergonomique avec guide dans le développement d'un projet. PVsyst permet d'importer des données météo d'une dizaine de sources différentes ainsi que des données personnelles. [41]

III.9.2 But de l'utilisation :

Le logiciel PVsyst permet de :

- Prédimensionnement
- Estimation rapide de la production pour une première étude de vos installations
- Conception de projet
- Etude détaillée, dimensionnement et simulation horaire, résultats dans un rapport complet imprimable.
- Données météo (importation de diverses sources, génération synthétique, ...).
- Base de données de composante (module PV, onduleur, batteries, pompes, etc.)
- Outils didactiques, (géométrie solaire, optimisation de l'orientation, comportement électrique de champs PV avec ombrage).
- Analyse de données réelles mesurées (avancé) [41]

III.9.3 Principe de fonctionnement :

Deux options caractérisent le logiciel PVsyst :

III.9.3.1 Pré dimensionnement :

Le logiciel PVsyst permet le pré dimensionnement d'un projet, en quelques clics, sans composant réels, première évaluation des dimensions du système et de son composant le pré dimensionnement concerne trois systèmes : [41]

- Couplé au réseau
- Isolé avec batteries
- Pompage

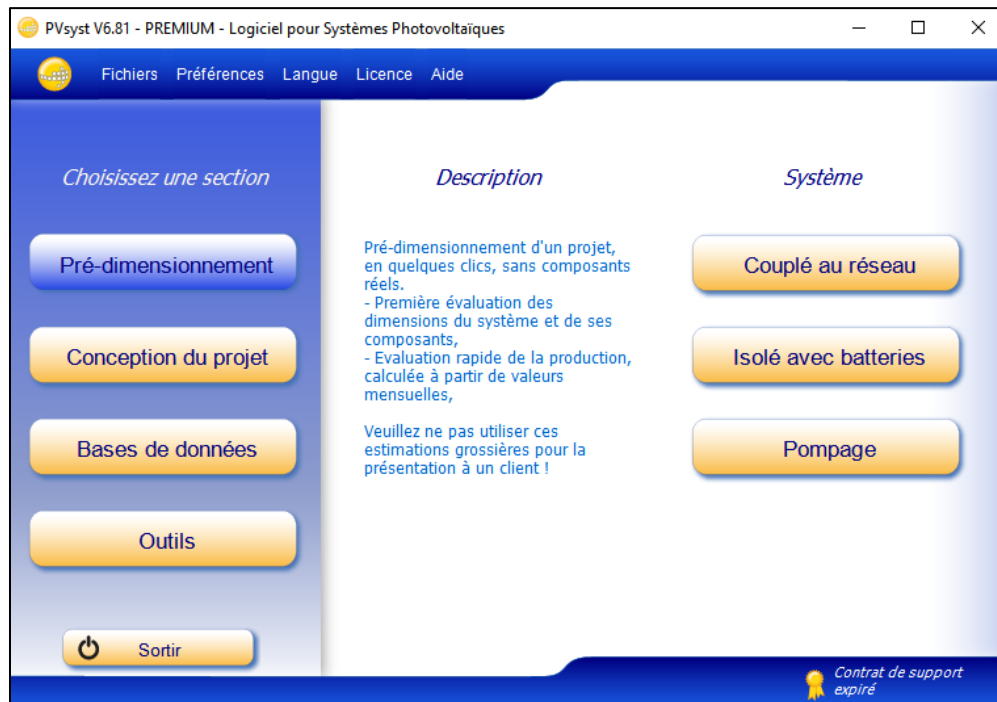


Figure III.13 : Pré dimensionnement de logiciel PVsyst [41]

III.9.3.2 Conception du projet :

Conception et dimensionnement final du projet dans cette option le PVsyst va : [41]

- Etude et analyse détaillée d'un projet
- Calcul de la production à partir de simulations détaillées en valeur horaires.
- Différentes variantes peuvent être simulées et comparées
- Masques lointains, et outil 3D pour les ombrages d'objets proches
- Analyse détaillée des pertes du système
- Evaluation économique, selon les composants réels.

Conception et dimensionnement final du projet concerne quatre systèmes :

- Couplé au réseau.
- Isolé avec batteries.
- Pompage.
- Réseau cc.

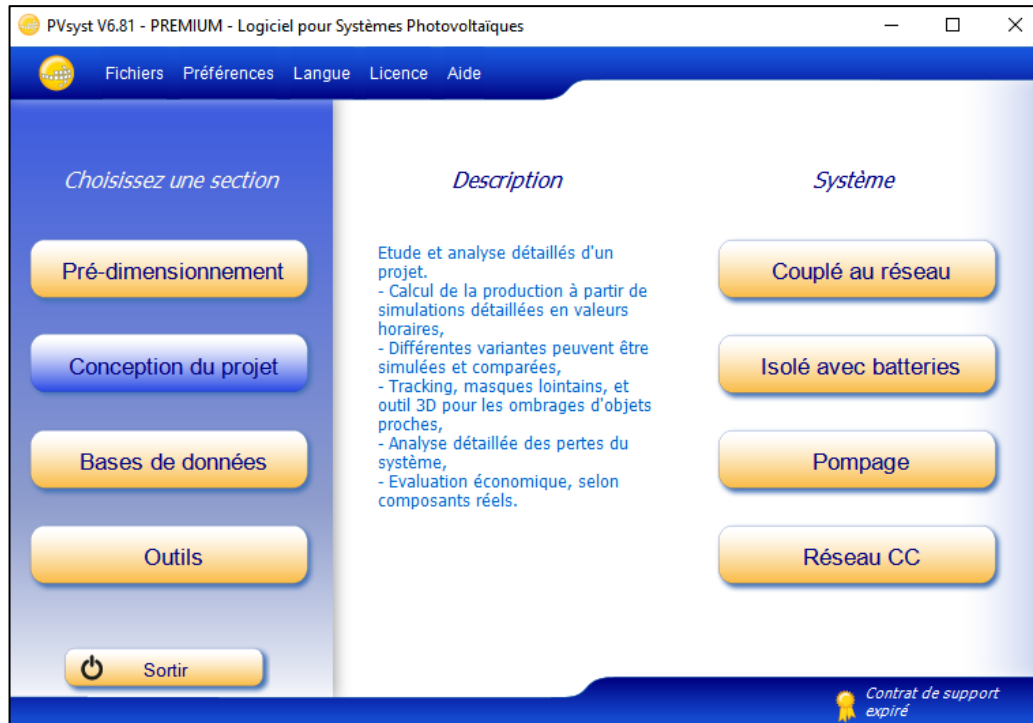


Figure III.14 : Conception du projet de logiciel PVsyst [41]

Conclusion :

Ce chapitre nous a permis déterminer les besoins en eau et déterminer leur emplacement d'avoir le choix spécifique de chaque élément du système de pompage photovoltaïque étant fait, nous avons entamé le dimensionnement de tout le système afin de pouvoir le modéliser. Nous avons ensuite défini le programme et expliqué ses caractéristiques les plus importantes et qui nous aidera dans ce travail ce qui fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre IV

Simulation et discussion des résultats

IV.1 Introduction:

Dans ce travail, nous avons fait l'étude et le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque. Il est alors intéressant d'appliquer les techniques étudiées sur un site réel pour valider la méthode choisie et d'en tirer des conclusions. Pour cette étude pratique, nous avons choisi le site de la wilaya de Ouargla. Ouargla est une ville au sud-est Algérien. Elle est caractérisée par un climat saharien, une énergie d'ensoleillement de plus de 5 kWh/m² par jour et des ressources importantes d'eau souterraine [42]. Nous étudions le dimensionnement d'un système de pompage PV avec le logiciel PVsyst et dans lequel le stockage de l'eau est réalisé par le biais d'un réservoir afin d'irriguer une surface d'un hectare de palmiers.

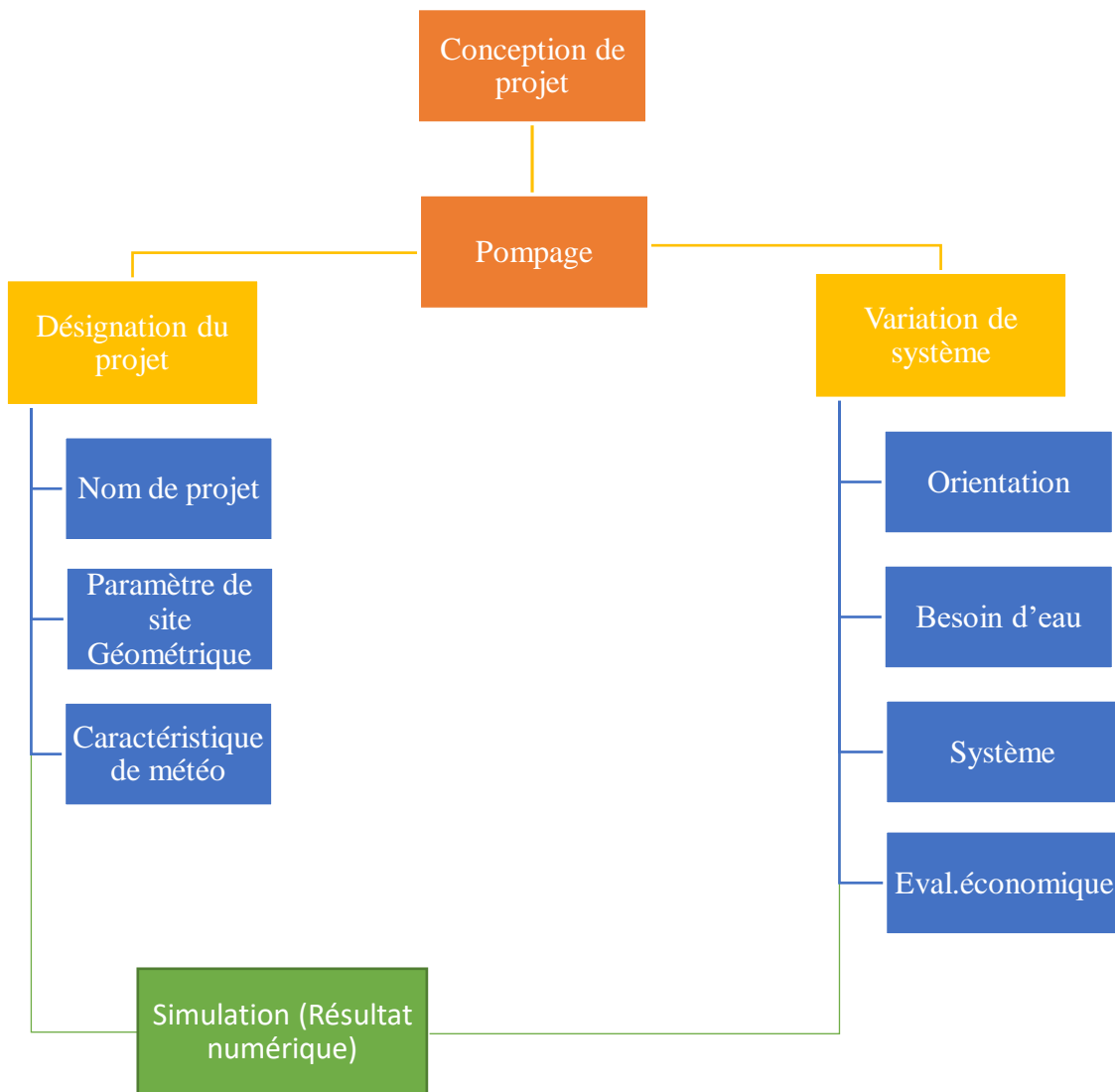


Figure IV.1 : Schéma synoptique d'un système de pompage photovoltaïque

IV.2 Les composants d'un système de pompage PV :

Un système de pompage solaire est généralement constitué de : [43]

- ✓ Le générateur photovoltaïque
- ✓ Le groupe électropompe
- ✓ L'électronique de commande et de contrôle
- ✓ La partie stockage

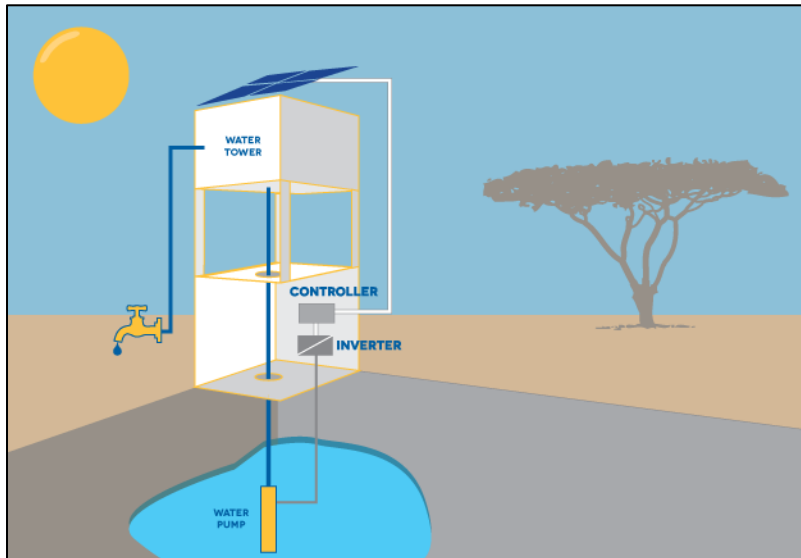


Figure IV.2 : Schéma simplifié de Pompage PV [44]

IV.3 Les étapes de dimensionnement de l'installation :

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

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

IV.3.1 Evaluation des besoins en eau :

Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, de la méthode d'irrigation et des facteurs météorologiques (la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, et la saison de l'année en question). Cependant, la pratique et l'expérience locale restent toujours très indispensables pour une évaluation correcte des besoins. Les besoins d'eau des palmiers pour la région de Ouargla sont donnés dans le tableau suivant :

[45]

Tableau IV.1 : Les besoins journaliers moyens mensuels en eau des palmiers / hectare

| Période | L'Evert | | | Le printemps | | |
|--------------------------|---------|------|------|--------------|-------|-----|
| Mois | Déc | Jan | Fév | Mar | Avril | Mai |
| Eau (m ³ / j) | 13 | 10 | 22 | 36 | 49 | 62 |
| Période | L'été | | | L'automne | | |
| Mois | Jun | Juil | Aout | Sep | Oct | Nov |
| Eau (m ³ / j) | 67 | 66 | 64 | 50 | 35 | 18 |

IV.3.2 Rayonnement solaire :

Le tableau ci-après donne les valeurs de rayonnement global journalier calculées sur la moyenne mensuelle pour des rayons incidents sur un plan incliné d'un angle optimal saisonnier sur le site de Ouargla [43]

Tableau IV.2 : Les valeurs globales de l'irradiation journalière mensuelle pour une inclinaison optimale saisonnière

| Période | L'Evert | | | Le printemps | | |
|--|---------|------|------|--------------|-------|------|
| Mois | Déc | Jan | Fév | Mar | Avril | Mai |
| \bar{H}_{TO} (wh / m ² / j) | 3735 | 3634 | 4486 | 5745 | 7076 | 7954 |
| Période | L'été | | | L'automne | | |
| Mois | Jun | Juil | Aout | Sep | Oct | Nov |
| \bar{H}_{TO} (wh / m ² / j) | 8296 | 8232 | 7833 | 7036 | 5912 | 4643 |

IV.3.3 Hauteur manométrique total :

Pour notre station de pompage, nous avons choisi une hauteur manométrique totale de 45 m.

IV.4 Dimensionnement de la station de pompage :

Le dimensionnement du système de pompage PV concerne : le calcul de la puissance crête du générateur photovoltaïque, le choix de la pompe et le choix de convertisseur répondants au service requis dans les conditions de référence. Ce dimensionnement prend en considération les deux conditions suivantes : [46]

- Choisir les besoins journaliers en eau durant la période de besoin maximal.
- Choisir le mois où l'ensoleillement maximal est le plus faible.

IV.4.1 Choix de la pompe :

Nous choisissons la pompe en fonction du débit et de la hauteur manométrique totale. Après avoir entré les valeurs des besoins en eau indiquées dans le tableau précédent et obtenu $41 \text{ m}^3/\text{j}$. Alors nous sélectionnons la pompe appropriée en fonction de l'énergie hydraulique nécessaire

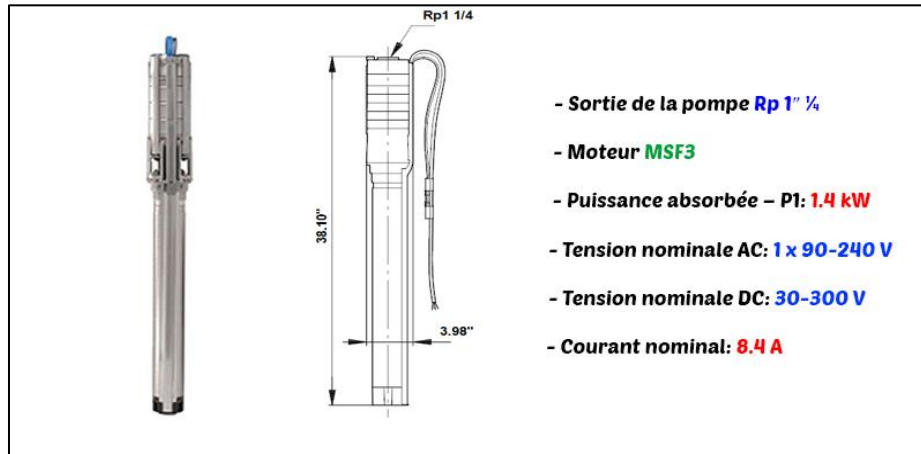


Figure IV.3 : pompe électriques GRUNDFOS SQF 3A-10 [47]

IV.4.2 La capacité du réservoir :

Rappelons que la technique de pompage choisi pour notre cas est le pompage dit «au fil de soleil ». Le stockage de l'eau est effectué dans un réservoir. La capacité de ce dernier est calculée pour répondre au besoin d'eau pendant les jours d'autonomie. celui-ci varie d'un à plusieurs jours. Pour notre exemple, la capacité de stockage est calculée pour assurer deux jours d'autonomie.

IV.4.3 Le convertisseur DC/DC (Controller) :

Un régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un convertisseur électronique DC/DC (courant continu vers courant continu) qui optimise en permanence les paramètres électriques de fonctionnement entre les 3 systèmes suivants :

- Le système photovoltaïque (constitué d'un ou plusieurs panneaux solaires)
- Le dispositif batterie (composé d'une ou plusieurs batteries)
- Les applications utilisant l'énergie (moteur, pompe, éclairage, réfrigérateur, etc.)

Dans cette étude, nous avons choisis le type PS 1800 Old de fabricant LORENTZ.



Figure IV.4 : Lorentz PS1800 contrôleur, 102Vdc, 200Voc, 1800W [48]

IV.4.4 Les panneaux photovoltaïques :

Les modules de JA Solar sont fabriqués et ajustés de manière optimale pour répondre aux besoins du marché actuel ; la dimension du module scientifiquement conçue rend l'installation simple et facile ; chaque cellule du module est le célèbre « Made by JA Solar ».

Dans cette étude, nous avons sélectionné le panneau de fabricant JA SOLAR pour répondre aux besoins de l'énergie de la pompe avec les caractéristiques suivantes :

- Modèle : Si-Poly
- Puissance Maximal (Pmax) : 250 Wp
- Tension à Puissance Maximal (Vmax) : 31,28 V
- Courant à Puissance Maximum (Cmax) : 7,99 A
- Tension Circuit Ouvert (Voc) : 37,36 V
- Courant Circuit Court (Isc) : 8,63 A
- Efficacité Module : 14,33 %

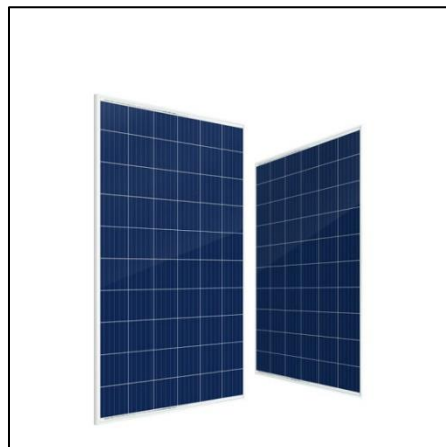


Figure IV.5 : Panneau solaire JA SOLAR 250 Wp 26 V si-poly JAP6(DG)60-250 [49]

IV.5 Simulation numérique :

IV.5.1 Données géographiques :

a) **Situation :** (OUARGLA)

Les coordonnées de Ouargla en degrés décimaux

Latitude : 31.98°

Longitude : 5.4°

b) **Orientation :**

Inclinaison Plan : 31°

Azimut presque : 0°

IV.5.2 Coordonnée géographique :

Un site géographique est défini par :

- Son nom, pays et région du monde
- Coordonnées géographiques : latitude, longitude, altitude
- Données météorologiques mensuelles.

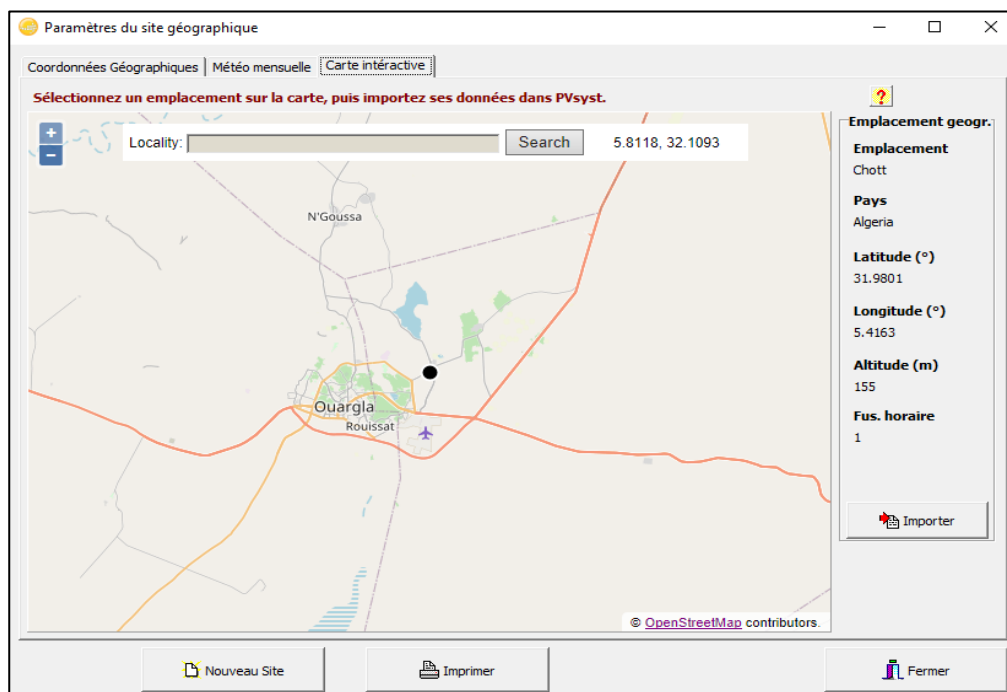


Figure IV.6 : Localisation de site de (Ouargla)

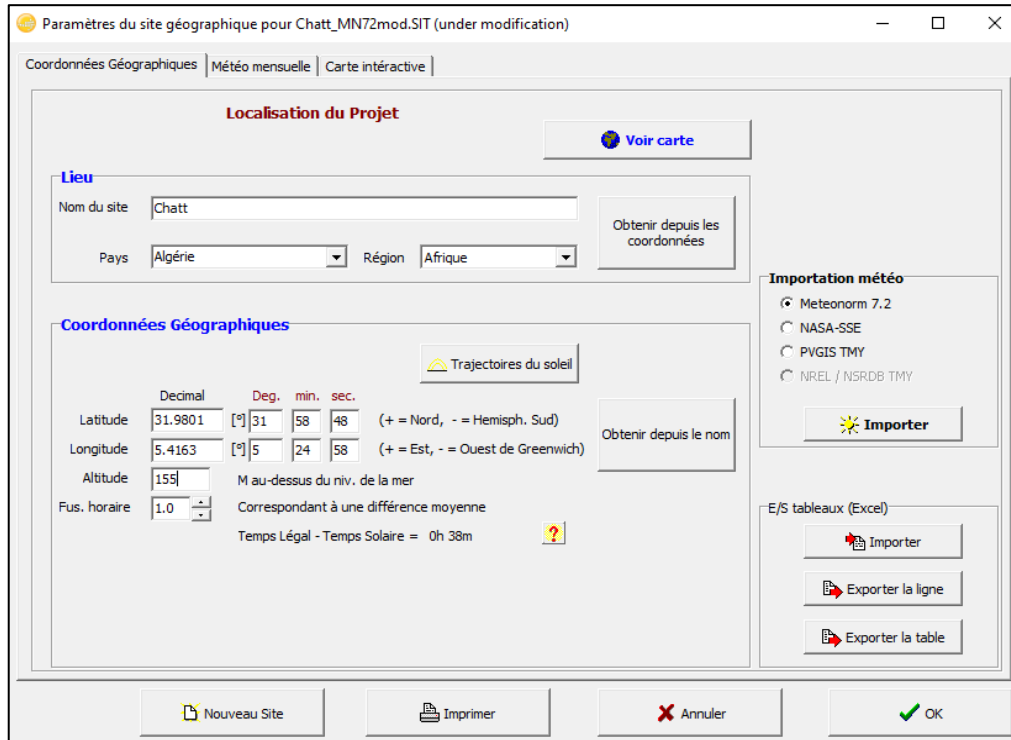


Figure IV.7 : coordonnée géographique de site (Ouargla)

IV.5.3 Données météorologiques :

Ces données résument les caractéristiques climatiques (l’irradiation et la température) du site de Ouargla, Il est conseillé de définir soigneusement la source des données

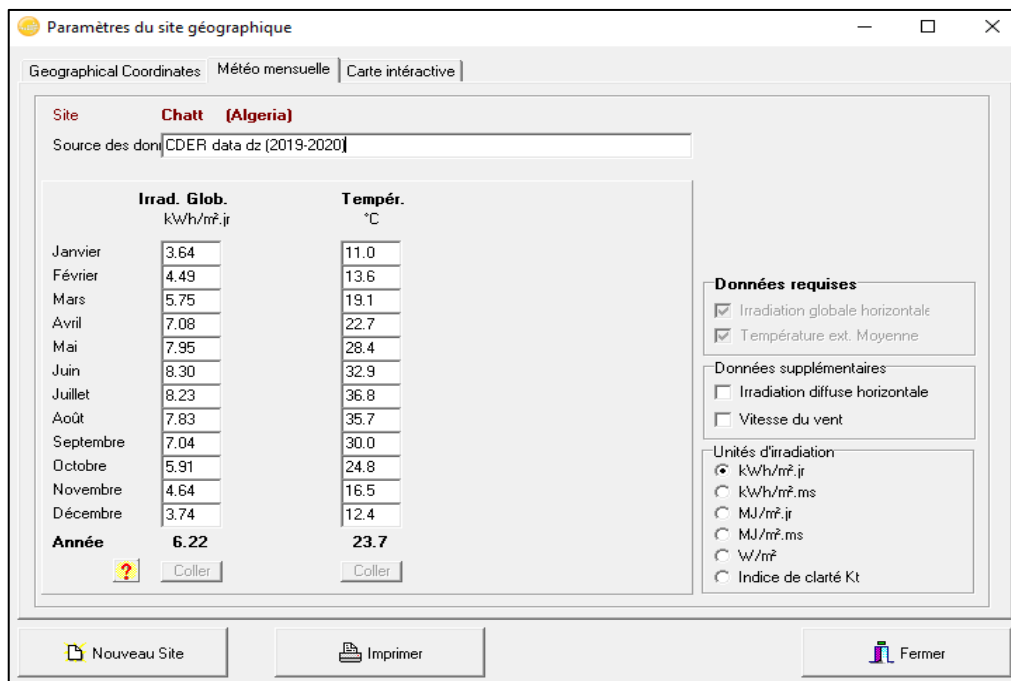


Figure IV.8 : Paramètres climatique de site de Ouargla

IV.6 Conception du projet :

Choisi le type d'installation : connecté au réseau, déconnecté du réseau, système de pompe solaire ou connecté à un réseau continu. Dans ce cas nous choisissons système de pompe

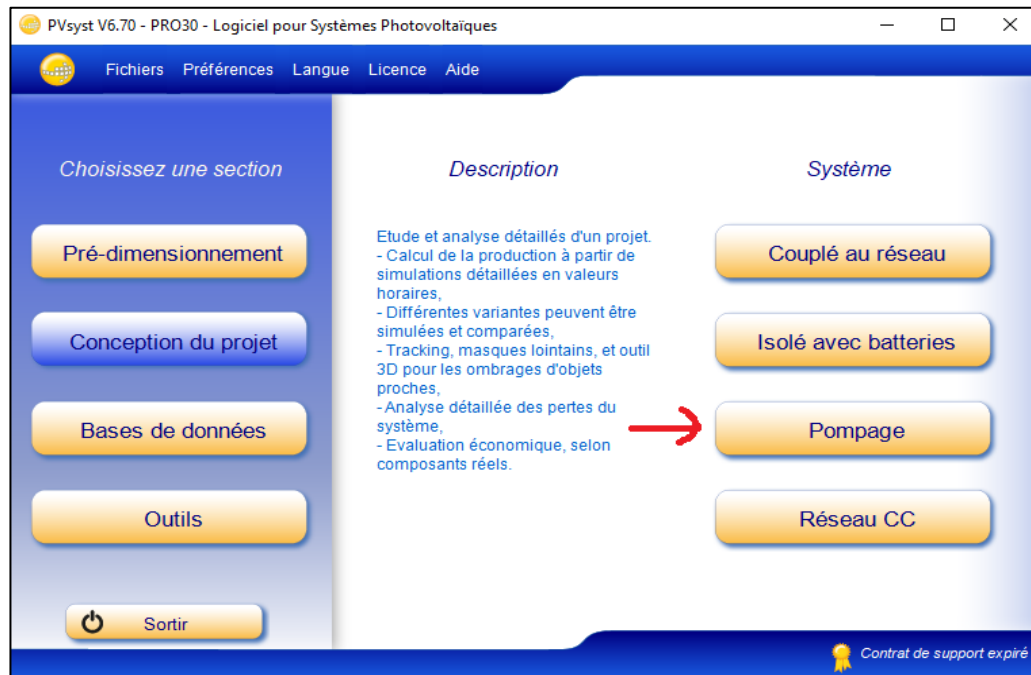


Figure IV.9 : Conception du projet

On aura plusieurs néanmoins plus d'étapes : choix du projet et de ses variables, orientation du panneau solaire, définition de l'horizon (ombre lointaines), définitions des ombres proches, définition du système et enfin résultats.

VI.6.1 Les étapes de conception d'un système de pompage PV :

Cela donne une procédure étape par étape lors de la définition d'un système de pompage en PVsyst :

➤ **Orientation des modules PV :**

Vu le prix élevé des modules PV, il est nécessaire de choisir des orientations et inclinaisons favorables à la production d'énergie.

Pour la simulation en technologie de silicium poly cristallin, nous avons choisi un plan incliné fixe d'une inclinaison 30° (par rapport à l'horizontale) comme l'illustre la figure 30° c'est l'inclinaison optimale donnée par le logiciel PVSYST, en dehors de cette dernière le rendement diminue.

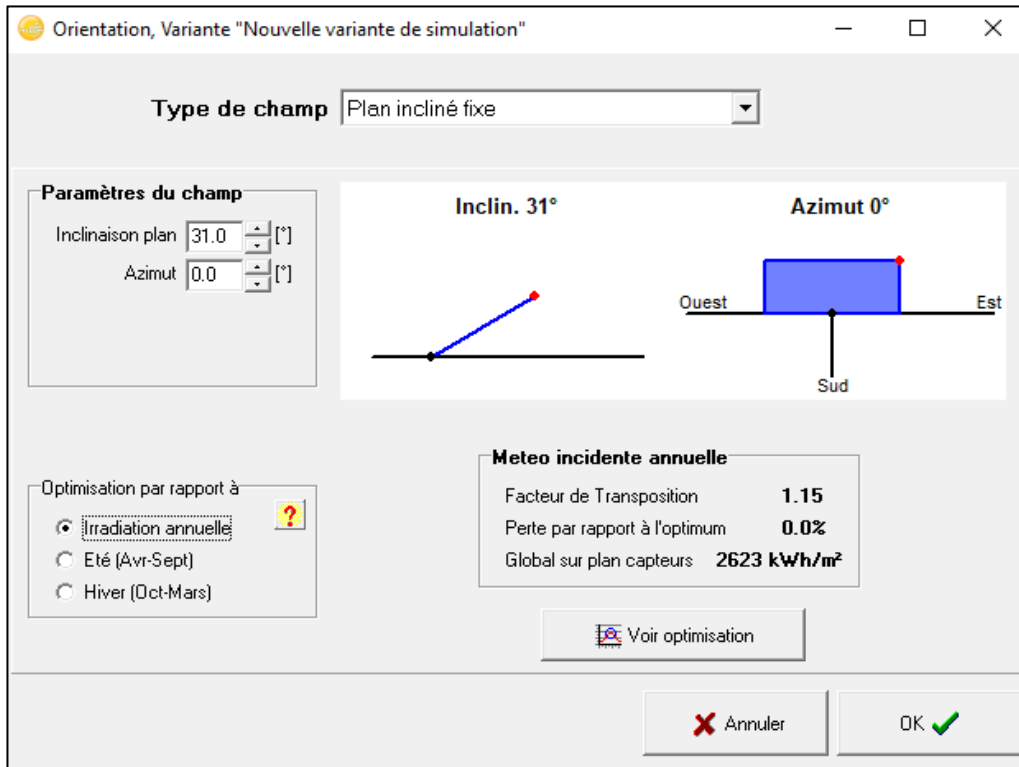


Figure IV.10 : Angle d'orientation

Le facteur Transposition : est le rapport de l'irradiation incidente (GlobInc) sur le plan, à l'irradiation horizontale (GlobHor). C'est à dire. Ce que vous gagnez (ou en vrac) lors de l'inclinaison du plan du capteur.

➤ **La définition des besoins d'eau :**

Sur la base des données enregistrées dans le tableau, nous saisissons les valeurs mensuelles des besoins en eau.

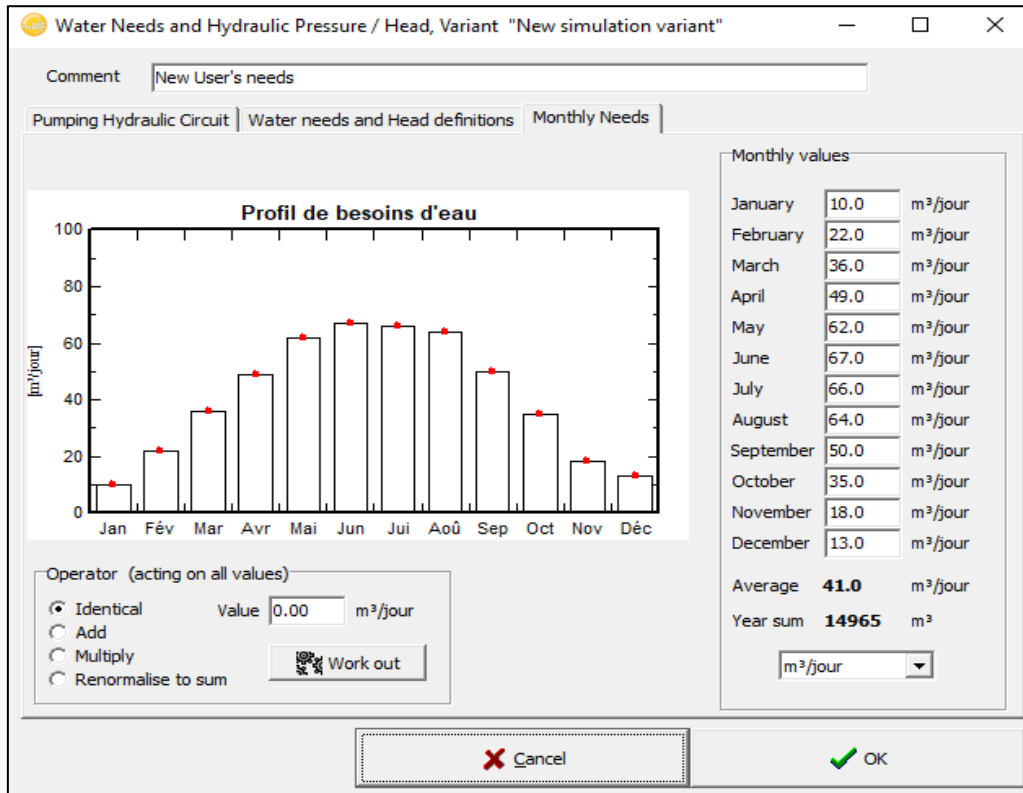


Figure IV.11 : Profil de besoins d'eau

Avec saisie les caractéristiques du puits, réservoir et le type de tube

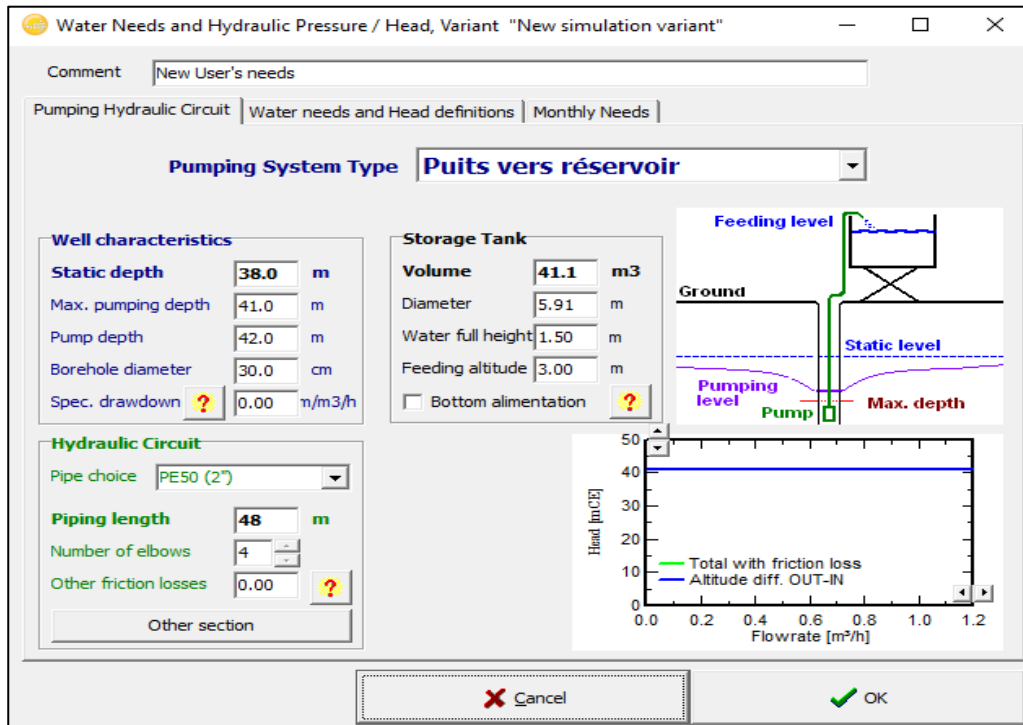


Figure IV.12 : Circuit hydraulique de pompage

➤ **La définition du système pompage PV :**

La conception de système est basée sur une procédure rapide et simple :

- Choisir le modèle et disposition de la pompe dans la base de données interne.

The screenshot shows a software window titled "Pumping system definition, Variante 'New simulation variant'". It is divided into several sections:

- Pre-sizing suggestions:** A pink header section containing:
 - Average daily needs: Head min. 41.0 mCE, Head max 41.7 mCE, Volume 41.1 m³/jour, Hydraulic power 926 W (very approximative).
 - Requested autonomy: 4.0 day(s)
 - Accepted missing: 5.0 %
 - Suggested tank volume: 268 m³
 - Suggested Pump power: 2.3 kW
 - Suggested PV power: 2.9 kWp (nom.)
- Pump definition | SubArray Design:**
 - Pump(s) model and layout:** A dropdown menu shows "Grundfos SQFlex". Below it, a selection bar shows "1.4 kW 30-70 m Well, DC, Centrifuge multi-étages SOF 3A-10 30-300V Since 2013" with an "Open" button.
 - Pumps configuration:** Two pumps are listed. Pump 1 is selected with "Pumps in serie" checked. Pump 2 is "Pumps in parallel".
 - Pumps pack operating:**
 - Pumps, total power: 3.37 W
 - Nominal voltage: 82 V
 - Nominal current: 40.91 A
 - Flowrate at Pmax: 8.8 m³/h
 - (All pump flows are parallel)
 - Pump characteristics:**
 - Pump technology: Centrifuge multi-étages
 - Motor: Moteur DC à aimant permanent
 - Maximal power: 2800 W, Voltage: 170 V, Max. Current: 16.5 A
 - Head Min / Nom / Max: 30 50 70 mCE
 - Corresp FlowRate: 4.9 4.0 3.0 m³/h
 - Corresp Power: 1400 1400 1400 W
 - Efficiency: 28.6 39.0 40.9 %
- Units for this project:**
 - Flow rate: m³/h
 - Head: mCE
 - Power: kW
 - Energy: kWh
- Hydro Energy calculation tool:**
 - Flow rate: 8.8 m³/h
 - Head: 42.0 mCE
 - Power: 1.004 kW

At the bottom, there is a "System overview" button, "Cancel" and "OK" buttons.

Figure IV.13 : Choix de la pompe

- Choisir les modules PV puis sélectionner le contrôle et le contrôleur dans la base de données interne.

Pumping system definition, Variante "New simulation variant"

Pre-sizing suggestions

| | | | | |
|--|--------------------|------------|-----------------------|--------------------|
| Average daily needs : | Requested autonomy | 4.0 day(s) | Suggested tank volume | 268 m ³ |
| Head min. 41.0 mCE | Accepted missing | 5.0 % | Suggested Pump power | 2.3 kW |
| Head max 41.7 mCE | | | Suggested PV power | 2.9 kWp (nom.) |
| Volume 41.1 m ³ /jour | | | | |
| Hydraulic power 926 W (very approximative) | | | | |

Pump definition SubArray Design

System information

| | | |
|-------------|------------------------|-----------|
| Chosen pump | SQF 3A-10 30-300V | HeadRange |
| Technology | Centrifuge multi-étage | Flow Rate |
| Max. power | 2800 W | |

Presizing help

No Sizing Enter planned power 2.4 kWp,
 ... or available area 16 m²

Select the PV module

Disponibles

JA Solar 250 Wp 26V Si-poly JAP6(DG) 60-250 Since 2013 Manufacturer 2014

Approx. needed modules 1 Sizing voltages: Vmpp (60°C) 26.1 V
Voc (-10°C) 42.2 V

Select the control mode and the controller

Universal controller Control mode Convertisseur MPPT-DC

Tous les fabricants 1.8 kW Convertisseur MPPT-DC PS 1800 Lorentz Da

Number of controllers 2

PV Array design

Number of modules and strings

Mod. in serie 3 should be : 3 seule possibilité 3
 5

Overload loss N/A
 Pnom ratio N/A
 Nb modules 15 Area 25 m²

Operating conditions :

| | |
|-------------|-------|
| Vmpp (60°C) | 78 V |
| Vmpp (20°C) | 94 V |
| Voc (-10°C) | 126 V |

Plane irradiance 1000 W/m²

| | | | |
|--------------|--------|----------------------------------|----------------|
| Impp | 40.9 A | Max. operating power | 3.4 kW |
| Isc | 43.2 A | à 1000 W/m ² et 50°C) | |
| Isc (at STC) | 43.2 A | Array's nom. power (STC) | 3.8 kWp |

Figure IV.14 : Choix du module et le Controller

IV.7 Résultats et discussions de la simulation numérique :

• Résultats détaillés :

La Figure suivante montre l'énergie incidente sur le plan des panneaux en fonction du mois de l'année on remarque une variation de l'énergie au cours des mois de l'année, pour une étude plus complète, d'autre résultat concernât l'énergie incidente de référence sur le pan des panneaux, l'énergie journalière incidente sur le plan des panneaux est 6.860 KWh/m².jour pour un fonctionnement en mode normal.

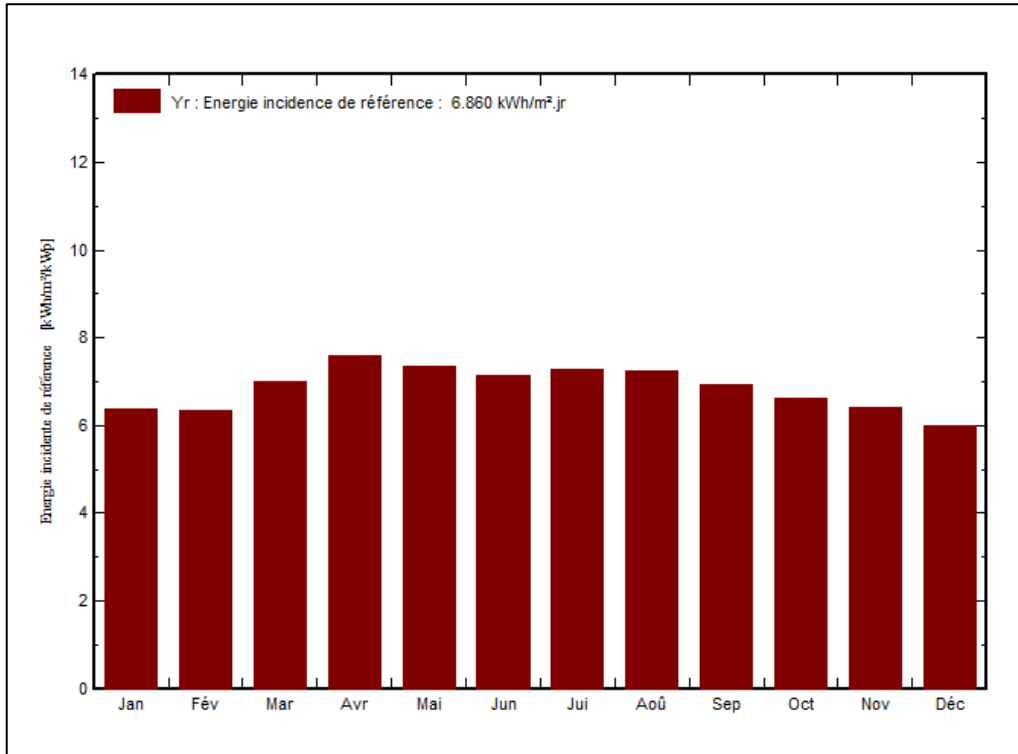


Figure IV.15 : Energie incidente de référence sur le plan des panneaux

La distribution de cette même énergie le long de l’année est illustrée par la figure ci-après.

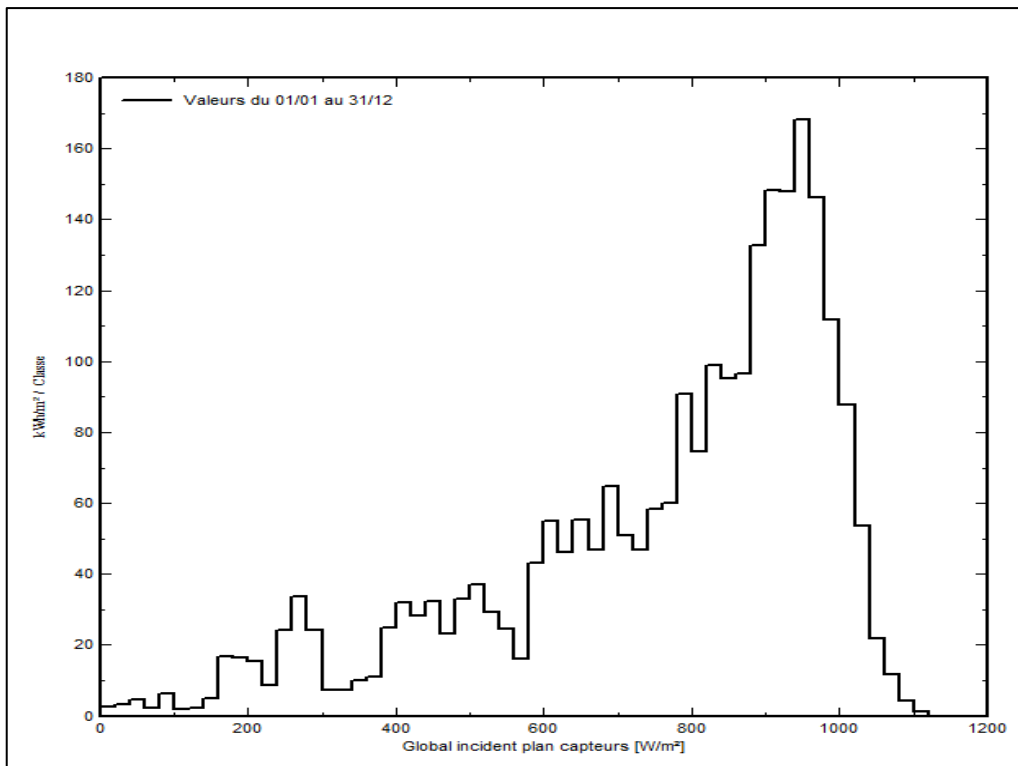


Figure IV.16 : Distribution de l’irradiation incidente

La courbe (Figure IV.17) représente la production normalisée pour un puissance nominale de 3750 Wc nous remarquons qu'en hiver il y a une diminution de l'énergie utilisé et des pertes, alors qu'une augmentation de l'énergie non utilisé contrairement à la saison de l'été nous remarquons une augmentation de l'énergie utilisé et des pertes et une diminution de l'énergie non utilisé

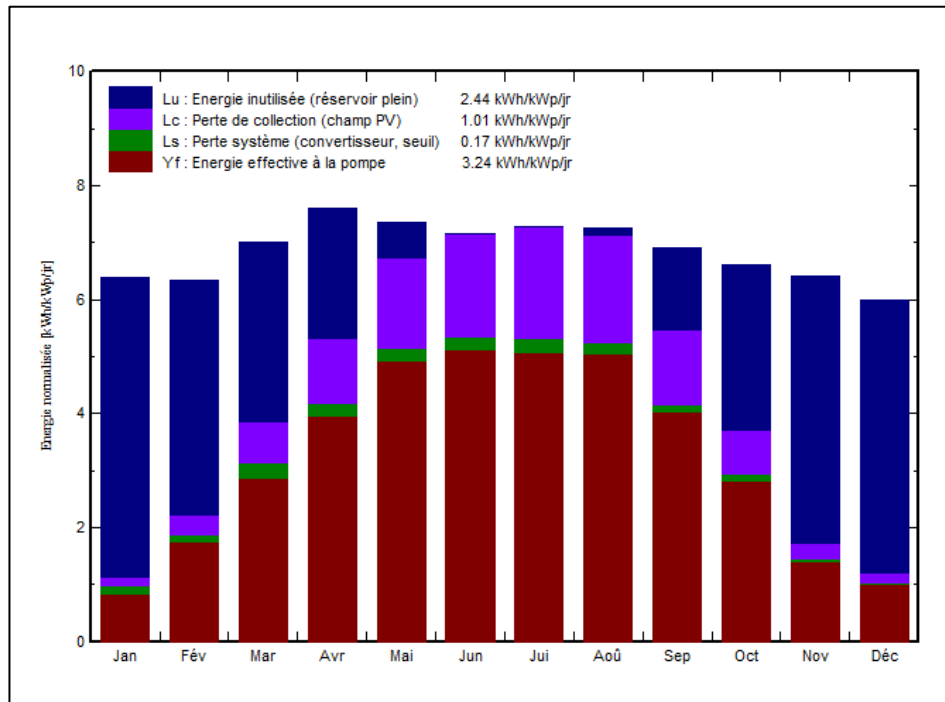


Figure IV.17 : Les productions normalisées

Nous notons à travers la courbe (Figure IV.18) malgré la variance de tous les valeurs l_s , l_u , l_c , y_f , mais le facteur de production reste fixé

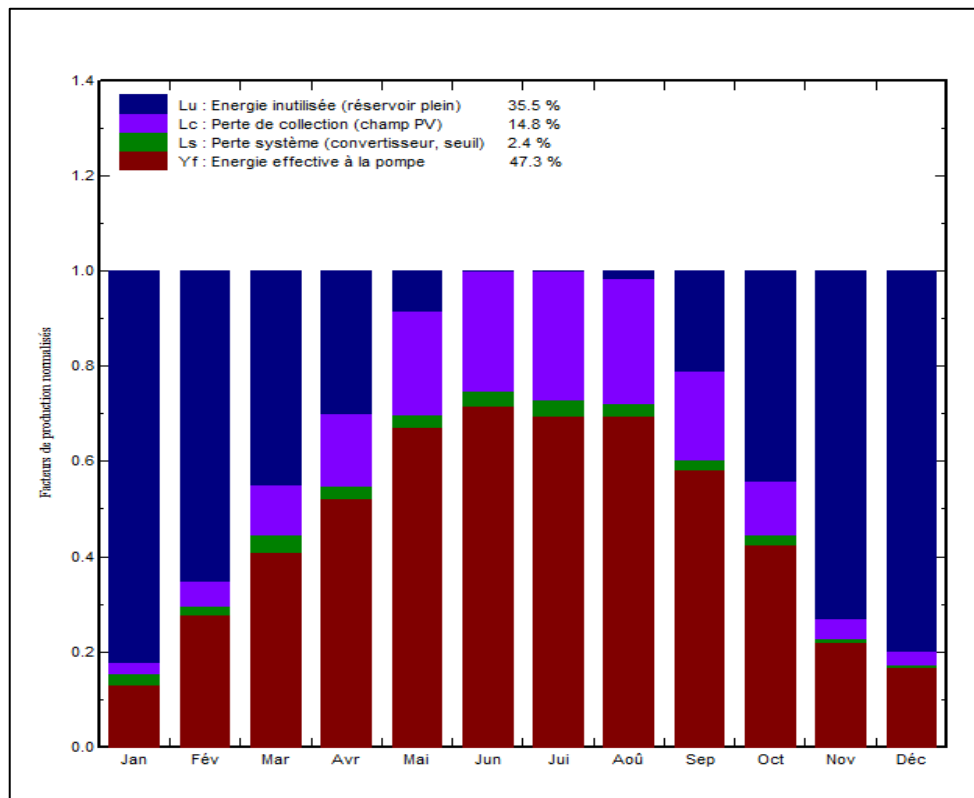


Figure IV.18 : Facteurs normalisés de production et de perte

La Figure IV.19 représente l'indice de performance (PR) en fonction du les mois d'année on remarque la valeur minimale en mois de janvier est 0.1 et la valeur maximale est de 0.6 dans le mois juillet et dans ce cas la performance annuelle moyenne de système est égale 0.473 (47%)

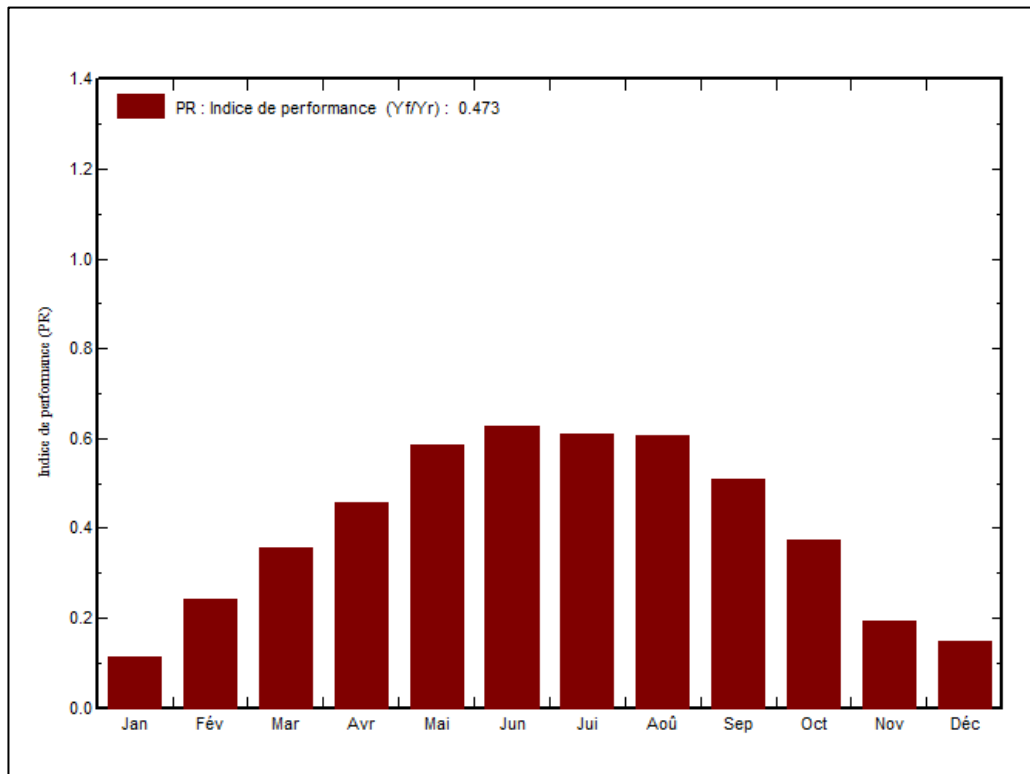


Figure IV.19 : Indice de performance

Le résultat le plus signifiant est présenté sous forme de diagramme d'entrée/sortie reportant, pour chaque période, l'énergie effective en fonction de l'énergie incidente (Figure IV.20) les points des fonctionnements sont alignés sur une droite, dont la pente est directement liée à l'efficacité du système.

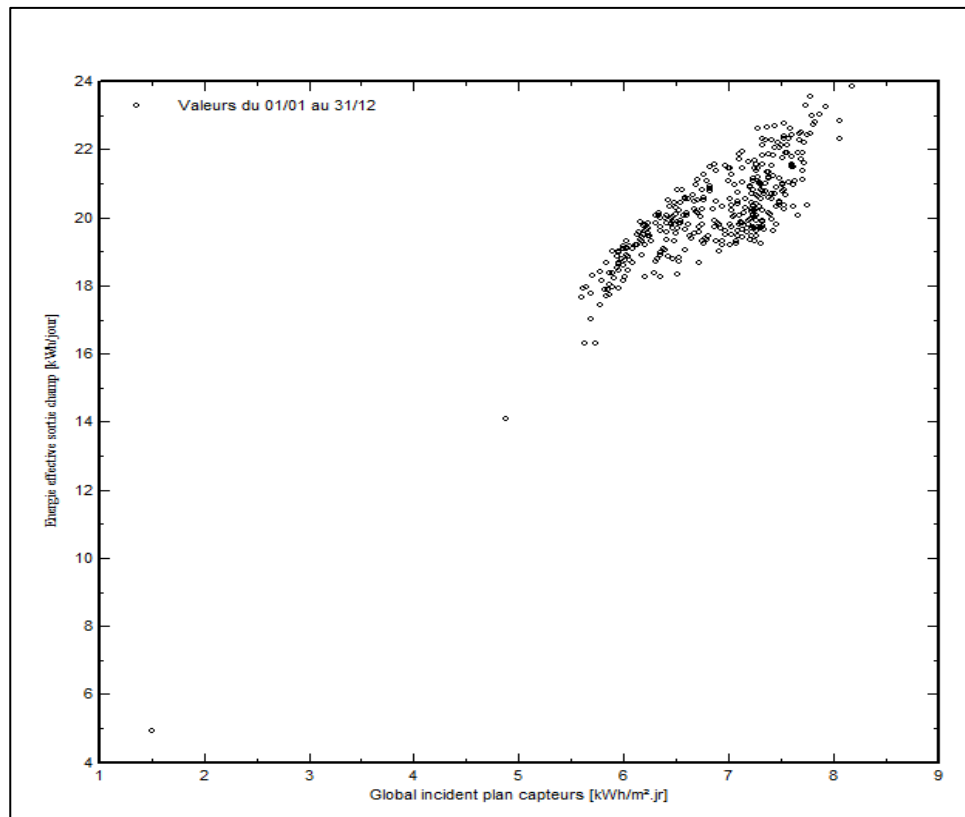


Figure IV.20 : Diagramme d'entrée/sortie journalier

La courbe (Figure IV.21) représente le débit moyenne en fonctionnement (m^3/h) en fonction de l'énergie disponible à la pompe (W) on remarque que le début il est nul dans l'intervalle $[0 - 380]$ watt puis il démarre à partir de 390 watt et augmente avec l'augmentation de l'énergie disponible à la pompe.

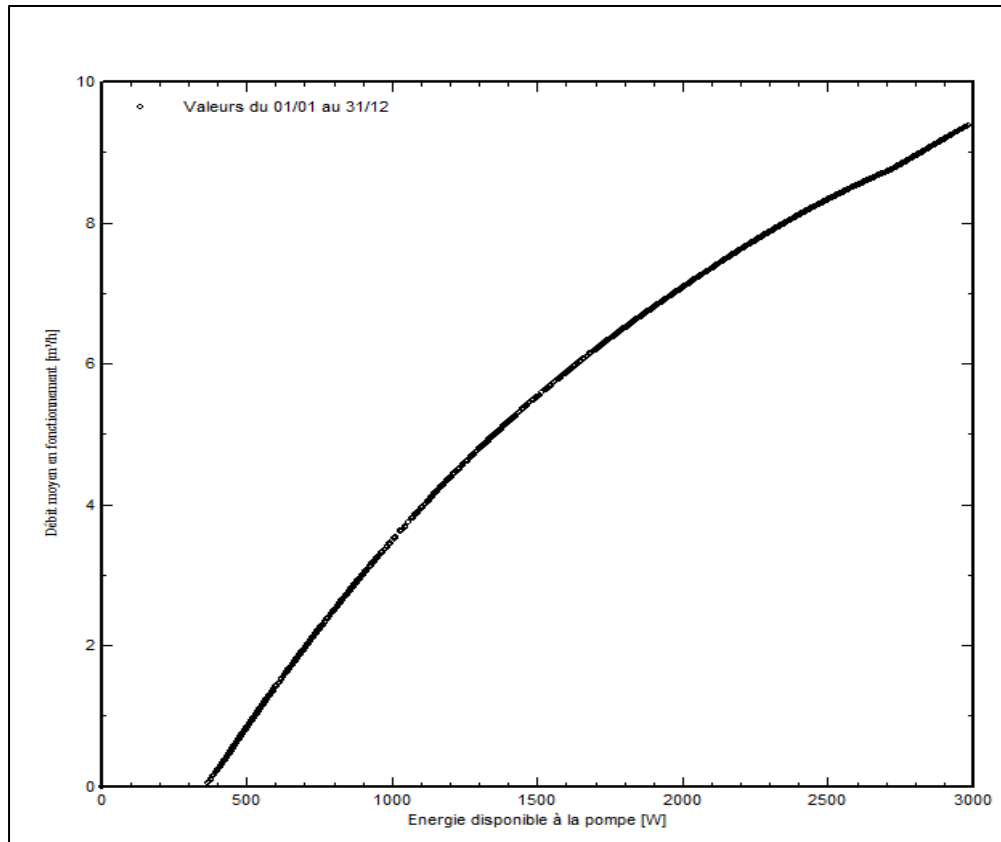


Figure IV.21: Débit en fonction de la puissance à la pompe

La Figure IV.22 représente le eau pompé (m^3/jour) en fonction du irradiation globale efficace quotidienne ($\text{KWh}/\text{m}^2.\text{jr}$) on remarque que les points des fonctionnements formés dans une direction verticale à partir d'une grande valeur de l'irradiation globale.

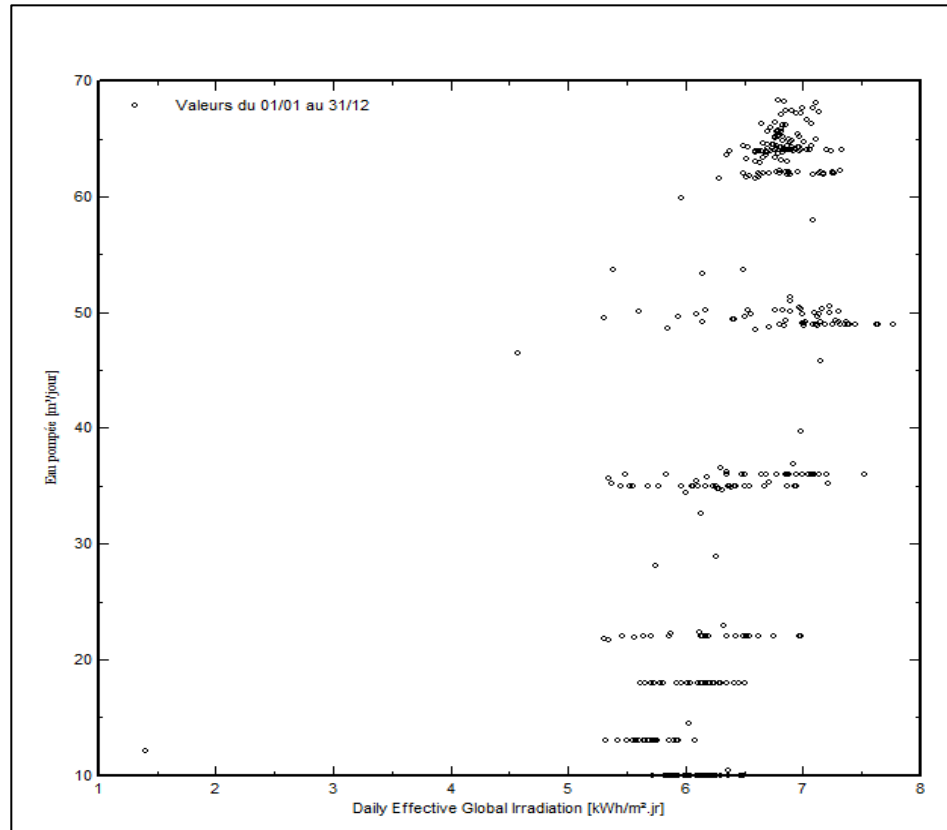


Figure IV.22 : Production d'eau journalière selon l'irradiation

La Figure IV.23 représente la distribution de la puissance du champ dans les mois d'année

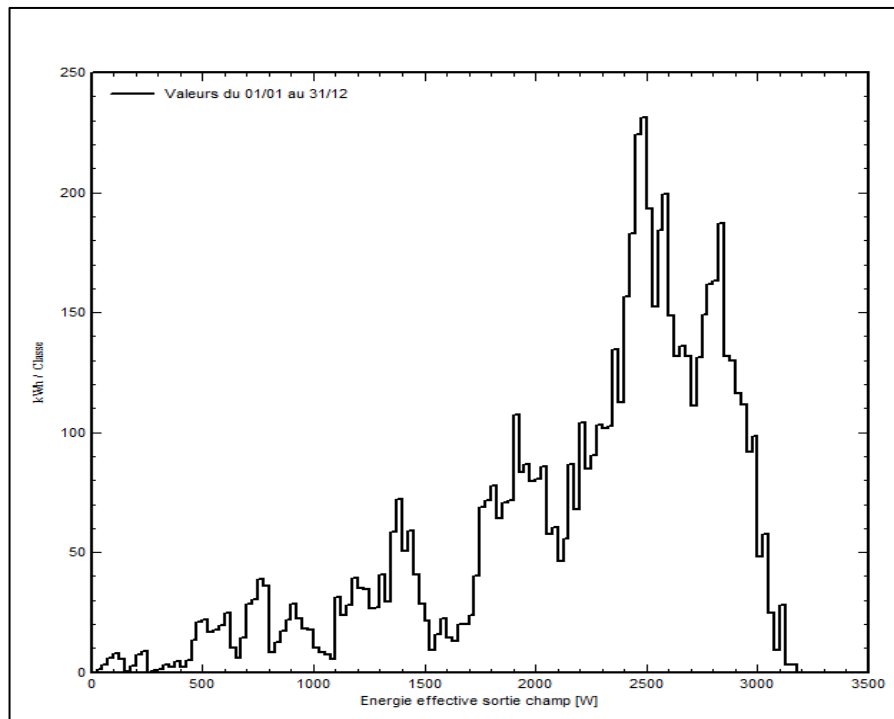


Figure IV.23 : Distribution de la puissance du champ

La Figure IV.24 représente l'énergie effective journalier à sortie du champ

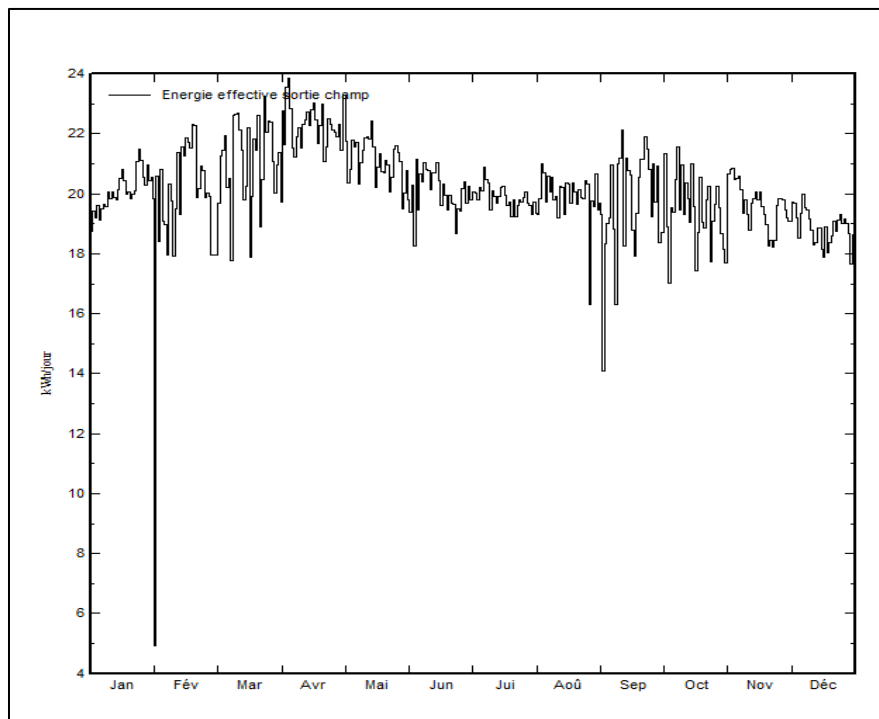


Figure IV.24 : Energie journalière à la sortie de champ

Tableau IV.3 : Tableau de Bilan et résultat principaux

| | GlobEff KWh/m ² | EarrMPP KWh | E PmpOp KWh | ETkFull KWh | H Pump mCE | WPumped m ³ /jour | W Used m ³ /jour | W Miss m ³ /jour |
|-----------|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Janvier | 188.1 | 622.9 | 97.0 | 496.0 | 41.41 | 10.60 | 10.60 | 0.000 |
| Février | 168.2 | 551.1 | 184.3 | 344.7 | 41.47 | 21.89 | 22.00 | 0.000 |
| Mars | 205.7 | 653.3 | 332.2 | 281.9 | 41.62 | 35.89 | 36.00 | 0.000 |
| Avril | 215.7 | 668.9 | 446.6 | 194.2 | 41.65 | 48.89 | 49.00 | 0.000 |
| Mai | 214.4 | 652.7 | 573.3 | 54.3 | 41.65 | 61.87 | 62.00 | 0.000 |
| Juin | 201.3 | 602.6 | 576.1 | 0.0 | 41.60 | 65.39 | 65.60 | 1.399 |
| Juillet | 211.9 | 618.2 | 589.4 | 0.0 | 41.59 | 64.73 | 64.74 | 1.261 |
| Aout | 212.0 | 619.6 | 585.7 | 9.4 | 41.60 | 63.92 | 63.72 | 0.279 |
| Septembre | 196.2 | 592.9 | 453.4 | 120.89 | 41.59 | 50.09 | 50.00 | 0.000 |
| Octobre | 194.4 | 603.5 | 327.2 | 255.0 | 41.57 | 35.13 | 35.00 | 0.000 |
| Novembre | 183.3 | 589.1 | 158.6 | 413.9 | 41.57 | 18.17 | 18.00 | 0.000 |
| Décembre | 176.8 | 584.8 | 117.3 | 452.0 | 41.45 | 13.05 | 13.00 | 0.000 |
| Année | 2368.0 | 7359.6 | 4441.0 | 2622.4 | 41.59 | 40.90 | 40.86 | 0.246 |

Résultats (tableau IV.3), nous pouvons voir que l'énergie non utilisée (ETkFull) (réservoir plein) diminue avec l'augmentation de la consommation d'eau (W utilisé) ainsi que l'énergie de fonctionnement pompe augmentez progressivement avec l'augmentation de la consommation d'eau.

Conclusion :

Le logiciel PVsyst permet de simuler un système de pompage photovoltaïque avec une prise en compte de tous les aspects : pertes, emplacement géographique, évaluation économique, ...etc. Ceci a permis de faire une meilleure estimation des pertes qui peuvent affecter le rendement global, les pertes dues au système du pompage et les jours d'autonomie est très importante pour le dimensionnement de ce système de pompage, d'où la nécessité d'opter pour une technologie de meilleure rendement possible de cette installation pompage photovoltaïque.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

Au vu des futurs développements concernant le secteur de l'énergie avec l'épuisement des énergies fossiles le siècle prochain, et l'utilisation progressive des énergies renouvelables, l'installation de systèmes photovoltaïques connaîtra certainement une cadence beaucoup plus accélérée.

Le recours aux méthodes de dimensionnement deviendra alors un réflexe systématique que se soit de la part des systémiers installateurs ou bien de la part des concepteurs « designers ». La méthode présentée dans ces modèles se veut aussi simple que les méthodes analytiques.

Le couplage direct d'un générateur (photovoltaïque) à une charge implique un point de fonctionnement dépendant particulièrement de la charge et qui n'est pas nécessairement celui optimal étant donné dans certaines conditions de travail le problème de perte en puissance devient significatif à mesure que la puissance de fonctionnement s'écarte de celle maximale. Cette mise en cause pour certaines charges devient une contrainte qui se répercute incontestablement, sur le rendement global du système dévoilant aussi un mauvais usage de cellules solaire.

Le système photovoltaïque très coûteux pouvant être donc parfois mal utilisé, plusieurs idées d'amélioration de ce fonctionnement sont apparues : la méthode la plus utilisée consiste à adapter l'impédance GPV à celle de la charge.

La méthode permettant de trouver le point de puissance maximale est basée sur la comparaison de la tension de fonctionnement et celle optimale.

On appellera par grandeurs optimales la tension et le courant par lesquels puissance maximale. La tension optimale (V_{opt}) et la tension en circuit ouvert (V_{co}) sont étroitement liées aux conditions climatiques (ensoleillement et température) et sont donc sujettes à des variations tout au long de la journée.

Ce modeste travail présente la modélisation du système PV ouvrant une grande porte de recherche devant nos futurs étudiants afin de contribuer dans l'amélioration du pompage à fil solaire et l'électrification rurale.

ANNEXES

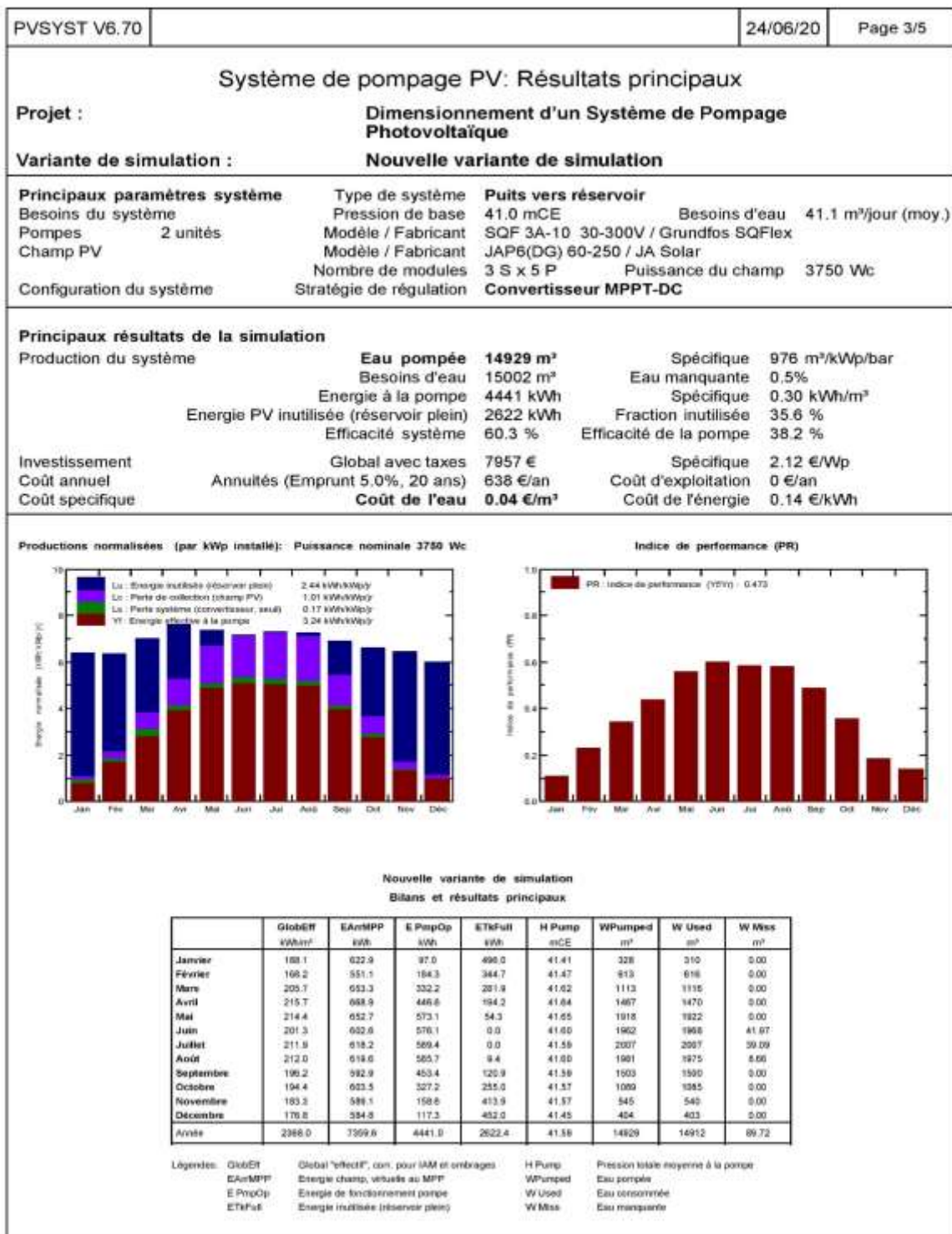
Annexe (a) : Paramètre de simulation de base

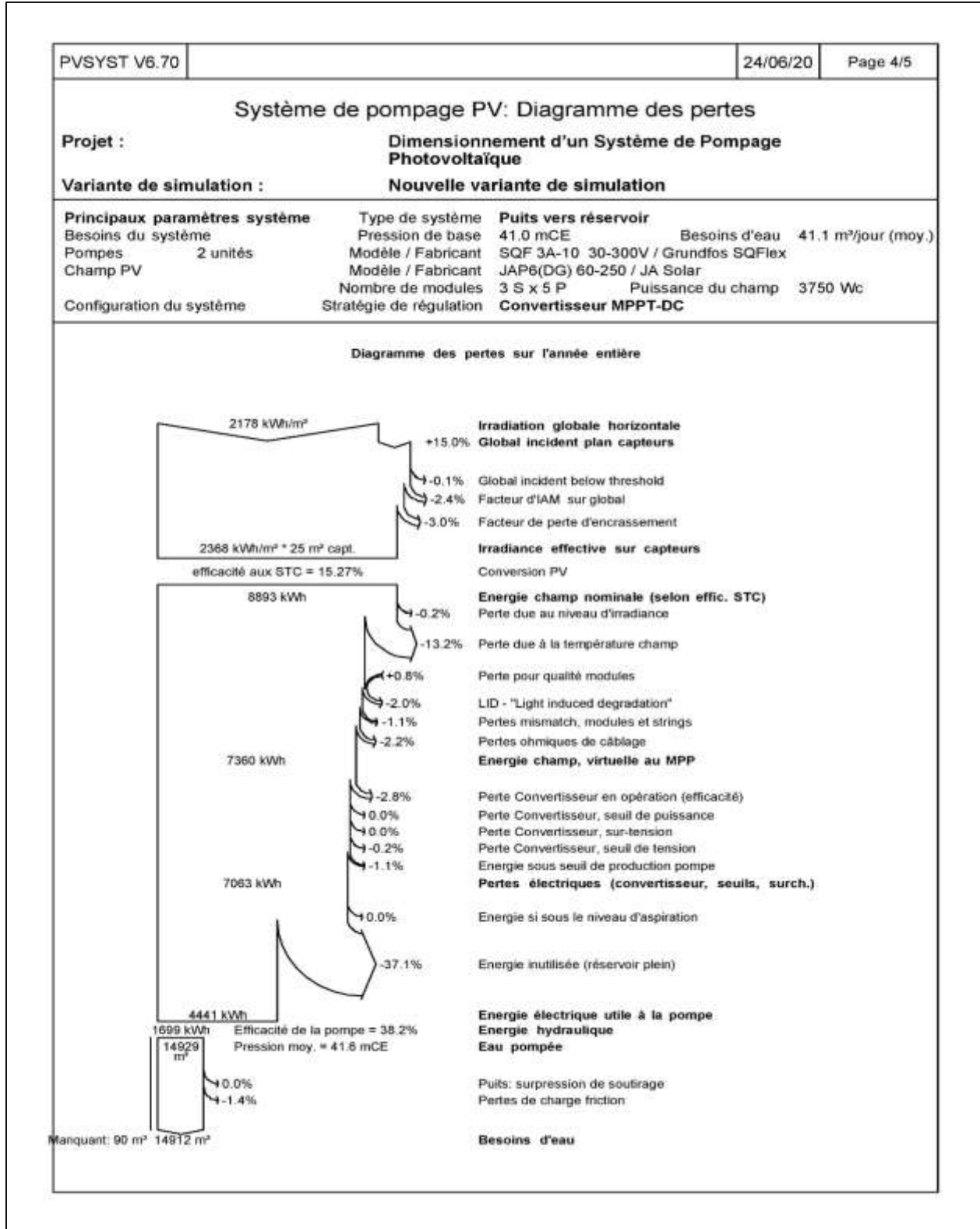
| | | | |
|--|-------------------------------|--|---|
| PVSYST V6.70 | | 04/07/20 | Page 1/4 |
| Système de pompage PV: Paramètres de simulation de base | | | |
| Projet : Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque | | | |
| Site géographique | Chatt | Pays | Algérie |
| Situation | Latitude 31.98° N | Longitude | 5.41° E |
| Temps défini comme | Temps légal Fus. horaire TU+1 | Altitude | 141 m |
| | Albédo 0.20 | | |
| Données météo: | Chatt | CDER data dz (2019-2020) - Synthétique | |
| Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation | | | |
| | Date de la simulation | 26/06/20 à 15h50 | |
| Paramètres de simulation | | | |
| Paramètres système de pompage | | Type de système | |
| Caractér. du puits (Diamètre 30 cm) | Prof. du niveau statique | 38 m | Baisse de niveau spéc. 0.00 m / m ³ /h |
| Réservoir | Prof. de la pompe | 42 m | Prof. maxi de pompage 41 m |
| Alimentation par le haut | Volume | 42.0 m ³ | Diamètre 6.0 m |
| Circuit hydraulique | Altitude d'injection | 3.0 m | Hauteur (niveau plein) 1.5 m |
| | Longueur de tuyaux | 50 m | Tuyaux PE50 Dint = 54 mm |
| | Nombre de coudes | 2 | |
| Besoins d'eau | Moyenne annuelle | 41.10 m ³ /jou | Distribution mensuelle Voir page suivante |
| Pompe | | Modèle SQF 3A-10 30-300V | |
| Technologie de la pompe | Fabricant | Grundfos SQFlex | |
| Convertisseur associé ou intégré | Centrifuge multi-étages | Pompe immergée (puits) | Moteur Moteur DC à aimant permanent |
| Conditions de fonctionnement | Type | MPPT | Plage de tension 30 - 300 V |
| | | Pression min. | Pression nom. |
| | | 30.0 | 50.0 |
| Débit maximum correspondant | | 4.90 | 4.00 |
| Puissance requise | | 1400 | 1400 |
| | | | 70.0 m ³ /h |
| | | | 3.00 m ³ /h |
| | | | 1400 W |
| Nombre de pompes | en parallèle | 2 pompes | |
| Orientation plan capteurs | Inclinaison | 31° | Azimut 0° |
| Caractéristiques du champ de capteurs | | | |
| Module PV | Si-poly | Modèle JAP6(DG) 60-250 | |
| Custom parameters definition | Fabricant | JA Solar | |
| Nombre de modules PV | En série | 3 modules | En parallèle 5 chaînes |
| Nombre total de modules PV | Nbre modules | 15 | Puissance unitaire 250 Wc |
| Puissance globale du champ | Nominale (STC) | 3750 Wc | Aux cond. de fonct. 3369 Wc (50°C) |
| Caractéristiques de fonct. du champ (50°C) | U mpp | 82 V | I mpp 41 A |
| Surface totale | Surface modules | 24.6 m ² | Surface cellule 21.9 m ² |
| Appareil de contrôle | | Modèle PS 1800 | |
| | Fabricant | Lorentz | |
| | Configuration du système | Convertisseur MPPT-DC | |

Annexe (b) : Paramètre de simulation détaillés

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------|--|--|------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|----------------------|
| PVSYST V6.70 | | 24/06/20 | Page 2/5 | | | | | | | | | | |
| Système de pompage PV: Paramètres de simulation détaillés | | | | | | | | | | | | | |
| Projet : | | Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque | | | | | | | | | | | |
| Variante de simulation : | | Nouvelle variante de simulation | | | | | | | | | | | |
| Principaux paramètres système | Type de système | Puits vers réservoir | | | | | | | | | | | |
| Besoins du système | Pression de base | 41.0 mCE | Besoins d'eau 41.1 m ³ /jour (moy.) | | | | | | | | | | |
| Pompes 2 unités | Modèle / Fabricant | SQF 3A-10 30-300V / Grundfos SQFlex | | | | | | | | | | | |
| Champ PV | Modèle / Fabricant | JAP6(DG) 60-250 / JA Solar | | | | | | | | | | | |
| | Nombre de modules | 3 S x 5 P | Puissance du champ 3750 Wc | | | | | | | | | | |
| Configuration du système | Stratégie de régulation | Convertisseur MPPT-DC | | | | | | | | | | | |
| Besoins d'eau: valeurs mensuelles | | | | | | | | | | | | | |
| Jan. | Fév. | Mars | Avr. | Mai | Juin | Juil. | Août | Sep. | Oct. | Nov. | Déc. | Année | |
| 10.0 | 22.0 | 36.0 | 49.0 | 62.0 | 67.0 | 66.0 | 64.0 | 50.0 | 35.0 | 18.0 | 13.0 | 41.1 | m ³ /jour |
| Contrôle de fonctionnement du système | | | | | | | | | | | | | |
| Convertisseur de puissance | | Convertisseur MPPT-DC | | | | | | | | | | | |
| Conditions de fonctionnement | Tension MPP minimale | 72 V | puissance nominale 1800 W | | | | | | | | | | |
| | Tension MPP maximale | 102 V | Puissance seuil 20 W | | | | | | | | | | |
| | Tension champ max. | 200 V | Efficacité maxi 98.0 % | | | | | | | | | | |
| | Courant d'entrée maxi | 0.0 A | Efficacité EURO 96.0 % | | | | | | | | | | |
| Remarques et Caractéristiques techniques | | | | | | | | | | | | | |
| "Controlling of the pump system, LED state indicators, Suited for 6-8 ""Standard 12V"" PV modules in series Enclosure, IP54 (sealed, weatherproof) Solar operation: MPPT Battery operation: Low voltage disconnect/reconnect Speed control: Max pump speed adjustable to reduce flow rate to 30% Two control inputs (tank full, dry running, or other remote control) Protections: Reverse polarity, overload, temperature Output: 3x100V electronically commutated for DC brushless motor " | | Dimensions: Largeur 178 mm Hauteur 395 mm Profondeur 150 mm Poids 4.50 kg | | | | | | | | | | | |
| Facteurs de perte du champ PV | | | | | | | | | | | | | |
| Encrassement du champ | | | Frac. pertes 3.0 % | | | | | | | | | | |
| Fact. de pertes thermiques | Uc (const) | 20.0 W/m ² K | Uv (vent) 0.0 W/m ² K / m/s | | | | | | | | | | |
| Perte ohmique de câblage | Rés. globale champ | 34 mOhm | Frac. pertes 1.5 % aux STC | | | | | | | | | | |
| Perte diode série | Chute de tension | 0.7 V | Frac. pertes 0.8 % aux STC | | | | | | | | | | |
| LID - "light Induced degradation" | | | Frac. pertes 2.0 % | | | | | | | | | | |
| Perte de qualité module | | | Frac. pertes -0.8 % | | | | | | | | | | |
| Perte de "mismatch" modules | | | Frac. pertes 1.0 % au MPP | | | | | | | | | | |
| Perte de "mismatch" strings | | | Frac. pertes 0.10 % | | | | | | | | | | |
| Effet d'incidence, paramétrisation ASHRAE | IAM = | 1 - bo (1/cos i - 1) | Param. bo 0.05 | | | | | | | | | | |

Annexe (c) : Résultats principaux



Annexe (d) : Diagramme des pertes

Annexe (e) : Evaluation économique

| | | | |
|---|-----------------------------|---|--|
| PVSYST V6.70 | | 24/06/20 | Page 5/5 |
| Système de pompage PV: Evaluation économique | | | |
| Projet : | | Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque | |
| Variante de simulation : | | Nouvelle variante de simulation | |
| Principaux paramètres système | Type de système | Puits vers réservoir | |
| Besoins du système | Pression de base | 41.0 mCE | Besoins d'eau 41.1 m ³ /jour (moy.) |
| Pompes 2 unités | Modèle / Fabricant | SQF 3A-10 30-300V / Grundfos SQFlex | |
| Champ PV | Modèle / Fabricant | JAP6(DG) 60-250 / JA Solar | |
| | Nombre de modules | 3 S x 5 P | Puissance du champ 3750 Wc |
| Configuration du système | Stratégie de régulation | Convertisseur MPPT-DC | |
| Investissement | | | |
| Modules PV (Pnom = 250 Wc) | 15 unités | 225 € / unité | 3375 € |
| Supports et intégration | | 70 € / module | 1050 € |
| Pompes (Pnom = *00 W) | 2 unités | 1089 € / unité | 2178 € |
| Régulateur, Convertisseur | | | 166 € |
| Construction, câblage, ... | | | 150 € |
| Moins-value substitution | | | 0 € |
| Investissement brut (sans taxes) | | | 6919 € |
| Financement | | | |
| Investissement brut (sans taxes) | | | 6919 € |
| Taxes sur l'investissement (TVA) | Taux 15.0 % | | 1038 € |
| Investissement brut (TTC) | | | 7957 € |
| Subventions | | | 0 € |
| Investissement net (TTC) | | | 7957 € |
| Annuités | (Emprunt 5.0 % sur 20 ans) | | 638 €/an |
| Entretien | | | 0 €/an |
| assurance, taxes annuelles | | | 0 €/an |
| Provision remplacement pompe | (durée de vie 5.0 ans) | | 0 ECU/year |
| Coût annuel total | | | 638 €/an |
| Coût de l'eau et de l'énergie | | | |
| Energie utilisée pour le pompage | | | 4441 kWh / an |
| Energie en excès (réservoir plein) | | | 2622 kWh / an |
| Coût de l'énergie utilisée | | | 0.00 € / kWh |
| Eau pompée | | | 14929 m ³ |
| Coût de l'eau pompée | | | 0.04 € / m³ |

Références Bibliographiques

- [1] A. Mehdaoui, thèse de magister«Identification par Rauschenbach et par Neuro-flou du point de puissance maximal du générateur photovoltaïques d'un système solaire en Milieu saharien»
- [2] Michael Boxwell, Solar Electricity Handbook: A Simple, Practical Guide to Solar Energy (2012), p. 41–42.
- [3] Stickler, Greg. "Educational Brief - Solar Radiation and the Earth System". National Aeronautics and Space Administration. Archived from the original on 25 April 2016. Retrieved 5 May 2016.
- [4] F. Lasnier, T. G. Ang, « Photovoltaic Engineering Handbook », IOP Publishing Ltd. 1980.ISBN 0-85274-311-4.
- [5]energipluslesite.be(<https://energipluslesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaiques/>).
- [6]<https://total.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/les-differents-types-de-cellules-photovoltaiques>
- [7] Djarallah, Mohamed, "Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique," université de Batna, Thèse de Doctorat en Science, 2008.
- [8] A. Bentaillah, « étude expérimental et de simulation des performances d'une installation PV de faible puissance », mémoire de Magister en physique énergétique, Tlemcen, 1994.
- [9]https://www.memoireonline.com/05/09/2066/m_Les-pompe-solaires--Dimensionnement-dune-station-de-pompage-en-zone-maracher0.html
- [10] K. Benlarbi, L. Mokrani, M. S. Nait-Said, « A fuzzy global efficiency optimization of a photovoltaic water pumping system », a LSPIE Laboratory, Electrical Engineering Department, Engineering Science Faculty, Batna University,2004.
- [11] Design and simulation of photovoltaic water pumping system », These de Doctorate, California Polytechnic State University San Luis Obispo, 2005.
- [12]energipluslesite.https://www.researchgate.net/figure/Systeme-photovoltaique-autonome_fig13_327839184
- [13]energipluslesite.https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/schema-panneau-photovoltaique.html?fbclid=IwAR12Ru-0IIPXOZi1OJcEUyjmPWqI95-egTLAxR_R34MpwgXJ74-UZN3yUAA.
-

- [14] [energipluslesite.http://www.sitiosolar.com/fr/le-pompage-solaire-photovoltaïque/?fbclid=IwAR2xvmkxpxTyyVDRL77SrZBBuR-iFg0RnB-5SGpHY1nJvFaDY3NxbaLBHts](http://www.sitiosolar.com/fr/le-pompage-solaire-photovoltaïque/?fbclid=IwAR2xvmkxpxTyyVDRL77SrZBBuR-iFg0RnB-5SGpHY1nJvFaDY3NxbaLBHts)
- [15] Mr : BENDJOUDI Faouzi, Mr : LAKHDARI Farid «Etude et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque avec batteries»
- [16] C. BERNARD, C. SEBRAO-OLIVEIRA, B. LAVAL et C. VAUDOUEUR « Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue » Rapport rédigé dans le cadre l'UV BA04-Energie renouvelable, Université de technologie Compiègne, 2009.
- [17] I. Vechiu « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome», thèse de Doctorat de l'Université du Havre, France, 2005.
- [18] <https://www.solaire-diffusion.eu/injection-reseau/52-solaire-photovoltaïque-panneaux/aides-ir.html>
- [19] A. LOUADAH « Modélisation et commande d'un système de pompage Photovoltaïque » Mémoire d'ingénieur en électromécanique ; université de BEJAÏA, 2009
- [20] <http://www.chimix.com/an12/bac12/sti4.html>
- [21] A. Oi. « Design and simulation of photovoltaic water pumping system », These de Doctorate, California Polytechnic State University San Luis Obispo, 2005.
- [22] J. Royer, T. Djako, « Le pompage photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Université d'Ottawa, 2002.
- [23] B. Multon, H. B. Ahmed, N. Bernard, « les moteurs électriques pour applications de grande série », Pierre-Emmanuel CAVAREC Antenne de Bretagne de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, Revue 3EI juin 2000.
- [24] <http://www.fao.org/3/ah810f/AH810F07.htm#figure64>
- [25] R. Chenni « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire » Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2007.
- [26] https://www.azprocede.fr/Cours_GC/pompe_volumetrique_piston.html
- [27] A. Betka, "Perspectives for the Sake of Photovoltaic Pumping Development in the South". Thèse de Doctorat Es-Sciences de l'Université de Batna, 2005.
- [28] A. Daud, M. M. Mahmoud, "Solar powered induction motor-driven water pump operating on a desert well, simulation and field tests", Renewable Energy, Vol. 30, pp. 701-714, 2005.
- [29] « Les Stations de Pompage Individuelles pour l'Irrigation », Editions Quae, 1996.
- [30] Kenna, J., and B. Gillett, 1985. Solar Water Pumping. A handbook.
-

- [31] Faculty of Electrical Engineering Master's thesis 2009 (pages : 42-45-46)
- [32] Williams, C.A., H.H. Whiffen, and D.Z. Haman, 1993. Water for livestock using solar generated electricity, Florida Energy Extension Service Fact Sheet EES-97, 5 pp.
- [33] Marsh, L., 2001. Pumping water from remote locations for livestock watering, Virginia Cooperative Extension, Publication 442-755, 8 pp.
- [34] B. hamidat, B. benyoucef.« Mathematic models of photovoltaic motor-pumpSystem » Renewable Energy Vol : 33, pages : 933-942, 2008.
- [35] D. Rekioua, A. hamidat, K. Haddouche, L. Katti« Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque », colloque nationale sur l'énergieSolaire, CNESOL'2006, Université de Bejaia, 29-30 Novembre 2006.
- [36] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. SadaSy.« Le pompage photovoltaïque, Editions multimonde », Québec, Canada, 1998.
- [37] Site web <http://gpip.cnam.fr/> Dimensionnement des pompes centrifuges
- [38] Site web <https://fr.wikipedia.org/> Cavitation
- [39] Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) -Direction des opérations QuartierIssil, Rue EklMechaar Al haram. BP.509/MarrakechGueliz.
- [40] Wilo Suisse Sa « Principes fondamentaux de la technologie des pompes »
- [41] dans accueil du logiciel PV PVsyst
- [42] A. Moumi, N. Hamani, N. Moumi et A. Z. Mokhtari, « Estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de Biskra», Centre Universitaire de Béchar–Algérie, 11 et 12 Novembre 2006.
- [43] S. Beringer, H. Schilke, I. Lohse, G. Seckmeyer, Case study showing that the tilt angle ofphotovoltaic plants is nearly irrelevant, Solar Energy 2011; 85: 470–476.
- [44] Prédimensionnement Pumping système presizing “ PVsyst “
- [45] A. DJAFOUR, « Etude d'une station de pompage photovoltaïque dans une région saharienne», Thèse de magistère, université de Ouargla, 2000.
- [46] expérimentation d'un système photovoltaïque de pompage d'eau utilisant un moteur à aimants permanents sans balais collecteur », Journée d'Etude sur l'Energie Solaire, Mardi 01 mars 2005, Bejaia.
- [47] site web Grundfos « Product center » Dessin Encombrement
- [48] Site web https://www.sines.fr/lorentz_ps1800hrc.html
- [49] Site web <https://fr.made-in-china.com/>
-