



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE
ET POPULAIRE**

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**Université Mohamed Chérif Messadia Souk Ahras
Faculté de Sciences et Technologies**

Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

*Présente pour obtenir le diplôme de
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE*

Option: Machine électrique

Présenté par

Badjoudj hichem

et

Thelaidjia abderrahmane

Thème

***Contribution à l'étude et au dimensionnement d'un
système de pompage photovoltaïque***

Soutenu publiquement

Le : 14/06/2023

DIRECTEUR DE MEMOIRE : Farid Berrezek

MCA U.SOUK-AHRAS

PRESIDENT : Hassainia Saida

MAA U.SOUK-AHRAS

EXAMINATEUR : Fathi Chouaf

MCB U.SOUK-AHRAS

Année universitaire 2022/2023

***Remerciements et
Dédicace***

Remerciements

Avant tout ça, nous remercions Dieu qui nous donne le courage et la patience pour préparer ce travail, nos remerciements vont tout droit,

pour notre encadreur

Dr. F. berrezek de nous suivre et de nous guide par son soutien et ses précieux conseils durant toute la période de préparation de ce travail. Notre remerciement à toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce présent de mémoire.

Dédicace

Je dédie ce travail À mes parents qui ont toujours été là pour moi, j'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour

À tous les enseignements de la faculté et surtout mon encadreur Dr.F. berrezzek

À Cher ami qui a m'a accompagné pour réaliser ce modeste travail

À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin

À tous ceux que j'aime et qui m'aiment

Hichem Gadjoudj

Dédicace

*Je dédie L'âme de mon cher père qui a toujours cru en moi
À ma source de joie, de vie et à la meilleur maman au monde
qui ne cesse pas de m'encourage*

À ma tante qui était une 2eme maman à mes yeux

*À mon cher frère bien aimer 'Anis' et chères sœurs 'Sofia et
Yasmine'*

À mon ami et bras droit 'Zikou'

À mes proches 'Oussama et Majeed'

*À la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je
dois de l'amour et la reconnaissance*

À tous qui me connait et compte sur moi de près ou de loin

À tous enseignants ma fournie le savoir

TheLaidjia abderrahmane

Table de matière

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralités sur le système de pompage photovoltaïque

I.1. Introduction 3
I.2. Energie solaire 3
I.3. Irradiation solaire 4
I.4. Effet photovoltaïque 5
 I.4.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque 5
 I.4.2. Les différents panneaux solaires 6
 I.4.2.1. Panneau solaire photovoltaïque 6
 I.4.2.2. Panneau solaire thermique et thermodynamique 7
 I.4.3. Les différents types des cellules photovoltaïques 7
 I.4.4. Circuit électrique équivalent 8
 I.4.5. Caractéristique des cellules photovoltaïque 9
 I.4.5.1. Influence de paramètre climatique 10
 I.4.5.2. Puissance max, facteur de puissance et le rendement 11
I.5. Méthodes de pompage photovoltaïque 12
 I.5.1. Pompage au fil du soleil 12
 I.5.2. Pompage avec stockage d'énergie 13
I.6. Constitution d'un système de pompage photovoltaïque (au fil de soleil) 14
 I.6.1. Générateur photovoltaïque 14
 I.6.2. le module photovoltaïque 14
 I.6.2.1. Groupement en série 14
 I.6.2.2. Groupement en parallèle 15
 I.6.2.3. La Protection du module PV 15
 I.6.3. Les convertisseurs (DC/AC) 16
 I.6.3.1. les onduleurs 16
 I.6.3.2. Types d'onduleurs 17
 I.6.3.3. Les application des onduleurs 17
 I.6.3.4. Onduleur de tension 17
 I.6.3.5. Type de commande d'onduleur 18
 I.6.3.6. Les types de commande en MLI 19
 I.6.3.7. MLI sinus-triangle 20
 I.6.4. Group moto pompe 20
 I.6.5. Moteur 21

I.6.5.1. Différent type de moteur	21
I.6.6. Les pompes.....	23
I.6.6.1. Différents types des pompes	24
I.6.6.2. Caractéristiques des pompes volumétriques et centrifuges.....	27
I.7. Conclusion	28

Chapitre II : Dimensionnement d'un system de pompage photovoltaïque

II.1. Introduction	29
II.2. Méthode de dimensionnement	29
II.3. Dimensionnement et le choix d'une pompe	30
II.3.1. Evaluation des besoins journaliers en eau	30
II.3.2. La hauteur manométrique totale (HMT)	30
II.3.3. Pertes de charge	31
II.3.4. Débit nécessaire	32
II.3.5. Choix de type de pompes.....	32
II.3.6. Diamètre des conduites	33
II.3.7. Calcul de l'énergie électrique requise	34
II.4. Dimensionnement du champ photovoltaïque	34
II.4.1. Calcul de la puissance crête.....	34
II.4.2. Le choix de tension du système	35
II.4.3. Calcul de nombre de panneaux solaire.....	35
II.5. Etude de cas et analyse.....	35
II.5.1. Présentation de la localité d'étude.....	35
II.5.2. Estimation de l'ensoleillement	37
II.5.3. Dimensionnement et choix de la pompe	38
II.5.4. Estimation de besoin d'eau	39
II.5.5. Capacité de la citerne	39
II.5.6. Dimensionnement de la pompe.....	40
II.5.7. Débit horaire nécessaire	40
II.5.8. Calcul de la hauteur manométrique totale HMT	40
II.5.9. Choix de la pompe.....	42
II.5.10. Dimensionnement du champ photovoltaïque.....	43
II.5.11. Analyse et simulation avec PVsyst	44
II.5.12. Résultat de simulation numérique	49

Table de matière

II.5.13. La comparaison entre résultat théorique et résultat de logiciel.....	54
II.6. Conclusion.....	54

Chapitre III : Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque

III.1. Introduction	56
III.2. Modélisation du générateur photovoltaïque.....	56
III.3. Modélisation de l'onduleur	57
III.4. Modélisation de la machine asynchrone	59
III.4.1. Equations électriques	60
III.4.2. Equations magnétiques.....	61
III.4.3. Modèle de Park de la Machine Asynchrone.....	61
III.4.4. Transformation de aux équations électrique	62
III.4.5. Transformation de aux équations magnétique	63
III.5. Modélisation de la pompe	66
III.6. Simulation du système pompage photovoltaïque	66
III.6.1. Simulation de générateur photovoltaïque	67
III.6.1.1. Influence les paramètres climatiques sur les courbes	69
III.6.2. Résultat de Simulation de l'onduleur et motopompe.....	71
III.6.3 Influence de l'irradiation sur le système global.....	75
III.7. Conclusion	77
Conclusion générale	78
Références Bibliographique	79
Annexe	81

Liste de figure et tableaux

Chapitre I : Généralités sur le système de pompage photovoltaïque

Figure I.1. Le rayonnement solaire	4
Figure I.2. Angle de zénith et "Air Mass" (AM)	5
Figure I.3. Schéma d'une jonction PN	6
Figure I. 4. Panneau solaire à surface plane et panneau solaire à concentration (parabolique)	7
Figure I.5. Les différents types des cellules photovoltaïques	8
Figure I.6. Cellule en silicium amorphe	8
Figure I.7. Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire	9
Figure I.8. Caractéristique $I=F(U)$ (1kWm^{-2} , 1.5 AM, 25 C	9
Figure I.9. Caractéristiques des cellules photovoltaïques sous différents niveaux d'éclairement	10
Figure I.10. Caractéristiques des cellules photovoltaïques multi cristallin aux variations de température (irradiance 1 000 W/m ²)	11
Figure I.11. Détermination du point de puissance maximale sur une caractéristique de fonctionnement d'une cellule PV	11
Figure I. 12. Schéma du principe de pompage au fil du soleil.....	13
Figure I.13. Schéma du principe de pompage avec stockage d'énergie	13
Figure I.14. Composantes d'un champ de modules photovoltaïques	14
Figure I.15. Groupement de cellules en série et l'influence sur la tension	15
Figure I.16. Groupement des cellules en parallèle et l'influence sur le courant	15
Figure I.17. Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)	16
Figure I.18. Onduleur triphasé	18
Figure I.19. Group moto pompe	20
Figure I.20. Schéma de principe de la Moteur.....	21
Figure I.21. Machine asynchrone triphasé	22
Figure I.22. Stator machine asynchrone	22
Figure I.23. Rotor bobiné de la machine asynchrone.....	23
Figure I.24. Rotor à cage d'écureuil de machine asynchrone.....	23
Figure I.25. Pompe volumétrique série M.....	25
Figure I.26. Pompes centrifuges.....	25
Figure I.27. Caractéristiques d'une pompe centrifuge	26

Chapitre II : Dimensionnement d'un system de pompage photovoltaïque

Figure II.1. Schéma et représentation des hauteurs du système	30
Figure II.2. Variation de débit en fonction d'heure d'ensoleillement	32
Figure II.3. Volume pompé par jour	33
Figure II.4. Variation de la température à la cour de l'année.	36
Figure II.5. Localisation de la wilaya de Souk ahras	36
Figure II.6. Moyenne mensuelles d'ensoleillement de souk ahras	38
Figure II.7. Schéma du forage	38
Figure II.8. La citerne d'eau	39
Figure II.9. Pompe immergée	40
Figure II.10. Structure du logiciel PVsyst	45
Figure II.11. Fenêtre d'identité de site	45
Figure II.12. Fenêtre de paramètre de météorologique	46
Figure II.13. Cordonné géographique de site	46
Figure II.14. Orientation de panneaux	47
Figure II.15. Définition de la pompe et module utilisé	48
Figure II.16. Trajectoire du soleil	48
Figure II.17. Paramètres de simulation d'une installation PV (pompage d'eau)	49
Figure II.18. Paramètre et caractéristique pompe, champ et forage	50
Figure II.19. Résultats et paramètres de production du système	50
Figure II.20. Paramètres de simulation d'une system PV pour pompage d'eau.....	51
Figure II.21. Energie utile produite par le champ PV	51
Figure II.22. Diagramme journalier d'Entrée/Sortie du système PV	52
Figure II.23. L'eau pompée en fonction de l'irradiation	52
Figure II.24. Diagramme des pertes	53

Chapitre III : Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque

Figure III.1. Schéma de réseau électrique équivalent d'une cellule solaire.....	56
Figure III.2. Onduleur triphasé	57
Figure III.3. Représentation schématique de la machine	60
Figure III.4. Représentation schématique de model de Park a l'axe dq	62
Figure III.5. Schéma globale de simulation du système pompage photovoltaïque	67
Figure III.6. Caractéristique tension en fonction du temps $U=f(t)$	67

Liste de tableaux

Figure III.7. Caractéristique courant en fonction du temps $I=f(t)$	68
Figure III.8. Caractéristique courant en fonction de la tension $I=f(U)$	68
Figure III.9. Caractéristique puissance en fonction de la tension $P=f(U)$	69
Figure III.10. Caractéristique $I=f(V)$ en fonction de l'irradiation	69
Figure III.11. Caractéristique $P=f(V)$ en fonction de l'irradiation	70
Figure III.12. Caractéristique $I=f(V)$ en fonction de la température	71
Figure III.13. Caractéristique $P=f(V)$ en fonction de la température	71
Figure III.14. Les tensions simples (U_a, U_b, U_c) à la sortie d'onduleur	72
Figure III.15. Zoom de la courbe de la tension simple U_a	72
Figure III.16. Courbe de la porteuse et la référence	73
Figure III.17. Courbe de la variation de vitesse (tr/min) en fonction de temps	73
Figure III.18. Courbe de la variation du couple moteur (C_{em})	73
Figure III.19. Courbe de variation de Débit (m^3/h).....	74
Figure III.20. La valeur de débit entre le scope.....	74
Figure III.21. Le débit m^3/h en fonction de la vitesse	75
Figure III.22. La variation de l'éclairement en fonction de temps	75
Figure III.23. La tension composée dans la sortie d'onduleur	76
Figure III.24. Le courant dans la sortie d'onduleur	76
Figure III.25. La vitesse de moteur en fonction de temps	76
Figure III.26. La variation de Débit en fonction de temps	77

Chapitre I : Généralités sur le système de pompage photovoltaïque

Tableau I.1. Commande de 180°	18
Tableau I.2. Commande de 120°	19
Tableau I.3. Caractéristiques des pompes volumétriques et centrifuges	28

Chapitre II : Dimensionnement d'un system de pompage photovoltaïque

Tableau II.1. Débits admissible et logique en fonction des diamètres de tuyaux.....	33
Tableau II.2. Le choix de tension de travail de système	35
Tableau II.3. Moyennes calculées avec les données de la station météo 'Souk Ahras' située à 3.2 km de Souk _Ahras.	37
Tableau II.4. Caractéristique du forage.....	38
Tableau II.5. Les trois normes pour le calcul de besoin d'eau	39
Tableau II.6. Éléments hydrauliques de la conduite et Coefficient de singularité	41
Tableau II.7. Caractéristique de pompe choisie	42
Tableau II.8. Caractéristique électrique	43
Tableau II.9. Caractéristique physique	43
Tableau II.10. Données requises à étudier	47
Tableau II.11. Les dimensions du réservoir et sa capacité.....	47
Tableau II.12. Caractéristique du forage à utiliser	47
Tableau II.13. La comparaison.	54

Liste d'abréviation

DC : Courant continu
AC : Courant alternatif
MLI : Modulation de Largeur d'impulsion
MAS : Machine asynchrone
MS : Machine synchrone
PV : photovoltaïque
GPV : Générateur photovoltaïque
HMT : Hauteur manométrique totale HMT

Liste De symbole

I_{ph} : la photo courant
I_d : le courant de diode
RP : Résistance parallèle
RS : Résistance série
I_{cc} : Courant de court-circuit
V_{co} : tension de circuit ouvert
q : charge d'électron
G : courante de cellule
K : constant
T : la température de la cellule en Kelvin
P_m : puissance max de cellule
I_m : courant max
V_m : tension max
FF : facteur de puissance
η : rendement
S : la surface de la cellule
φ : l'intensité du rayonnemen

Liste d'abréviation et symbole

P : Puissance transmise au fluide par la pompe en Watt.

Q : débit en m³/s.

ρ : masse volumique du fluide en kg/m³.

H : hauteur de charge en mètre.

9.81 : Intensité moyenne de la pesanteur

P_f : Puissance transmise au fluide

R_v : rendement mécanique du ventilateur

R_T : rendement de la transmission

H_r : hauteur entre la surface de la terre au réservoir

N_d : hauteur entre la nappe d'eau pompée à la surface de la terre (N_s+R_m)

N_s : Niveau statique, hauteur entre la surface d'eau et la surface de la terre

R_m : hauteur entre la nappe d'eau pompée et la surface d'eau

P_c : pertes de charge en (pa)

g : la gravité de terrestre

L_{p_c} : Perte de charge en (mCF)

mCF : Unité (mètres de colonne de fluide)

PL : pertes de charge linéaires

PP : pertes de charge ponctuelles

K₁ : Coefficient variant

Re : nombre de Reynolds

V : vitesse d'écoulement du fluide (m/s)

D : diamètre de la conduite

μ : viscosité dynamique en (kg/m.s) = 10⁻³ kg/m.s

λ : coefficient de perte de charge

L : La longueur de la conduite du tuyau

E_{elec} : l'énergie journalière consommée (Wh)

F_c : constant des pertes d'énergie (0.65- 0.75)

I_r : irradiation moyenne (kW/m²/j)

Liste d'abréviation et symbole

C_H : Constante hydraulique égale à 2.725 kg.s.h/m²

η_p : Rendement du groupe motopompe

P_{cr} : La puissance crête

N_P : Le nombre de panneaux

N_{Ps} : Le nombre de panneaux en série

N_{Pp} : Le nombre de panneaux en parallèle

H_e : Nombre d'heure d'ensoleillement

D_j : La valeur de la demande journalière

U_{sys} : tension de système

V_{mp} : tension max d'un panneau

$P_{méc}$: puissance mécanique

P_{hyd} : puissance hydraulique

I_{mp} : courant max d'un panneau

$V_a(t), V_b(t), V_c(t)$: tensions simples

$V_{ab}(t), V_{bc}(t), V_{ca}(t)$: tensions composées

V_S : tensions statorique

V_R : tensions rotorique

I_S : Courant statorique

I_R : Courant rotorique

\emptyset_S : Flux statorique

\emptyset_R : Flux rotorique

R_S : Résistance statorique

R_R : Résistance rotorique

Résumé-Abstract-ملخص

Résumé

Aujourd'hui, la demande en eau a beaucoup augmenté, en particulier dans les zones isolées et éloignées difficiles d'accès, et la plupart de ces zones contiennent une importante réserve d'eau souterraine, et donc, avec la disponibilité de l'énergie solaire, une étude a été faite qui permet de pomper l'eau grâce à l'énergie solaire. Pour cette raison, le but de notre travail était d'étudier le système de pompage photovoltaïque dans le fil solaire afin que l'eau soit stockée dans le réservoir, en utilisant une pompe centrifuge qui est entraîné par un moteur asynchrone à travers un onduleur de tension.

Ainsi que la réalisation d'une étude sur la zone de Hanancha située dans la wilaya de Souk Ahras pour obtenir les caractéristiques nécessaire pour réaliser ce processus.

Mots clés : l'énergie solaire, pompage photovoltaïque, pompe centrifuge, onduleur

Abstract

Today, the demand for water has significantly increased, especially in remote and hard-to-reach isolated areas, and most of these areas have significant underground water reserves. Therefore, with the availability of solar energy, a study has been conducted to enable water pumping using solar power. For this reason, the objective of our work was to study the photovoltaic pumping system in the solar wire, in which water is stored in a reservoir using a centrifugal pump driven by an asynchronous motor through a voltage inverter. Additionally, an investigation was carried out on the Hanancha area located in the Souk Ahras province to obtain the necessary characteristics for implementing this process.

Keyword: solar energy, photovoltaic pumping, centrifugal pump, inverter

ملخص

اليوم, ازداد الطلب على المياه بشكل كثير, خاصة في المناطق المعزولة و النائية والتي يصعب الوصول اليها, و معظم هذه المناطق تحتوي على مخزون معتبر من المياه الجوفية, و بالتالي و مع توفر الطاقة الشمسية و ردت الدراسة التي تسمح بضخ المياه باستعمال الطاقة الشمسية. و لهذا السبب كان الهدف من عملنا هو دراسة نظام الضخ الكهروضوئي في سلك الشمس بحيث يتم تخزين المياه في الخزان. و ذلك بتشغيل مضخة الطرد المركزي بواسطة محرك غير متزامن من خلال عاكس الجهد.

و كذلك إجراء دراسة تقنية اقتصادية على منطقة الحاناشة الواقعة بولاية سوق اهراس للوصول الى الخصائص اللازمة لتحقيق هذه العملية.

الكلمات المفتاحية : الطاقة الشمسية, الضخ الكهروضوئي, مضخة الطرد المركزي, العاكس

Introduction Générale

Introduction générale

Il est bien connu que l'accès à l'eau potable est une grande préoccupation de notre société actuelle. La demande en eau croît chaque année alors qu'en parallèle, la pluie est moins régulière dans de nombreuses zones arides. Sa disponibilité devient au fil du temps, plus complexe à assurer. D'autre part la production de l'énergie électrique par les méthodes classiques est en cours de diminution à cause de la réduction des énergies fossiles. De plus les énergies classiques, telles que le pétrole, le charbon et le gaz naturel, sont des sources d'énergie non renouvelables qui contribuent significativement aux émissions de gaz à effet de serre et à la pollution de l'air. Par voie de conséquence, Le remplacement de l'énergie fossile par l'énergie renouvelable est un enjeu majeur pour la transition énergétique et la lutte contre le changement climatique. Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie durables qui proviennent de ressources naturelles inépuisables, telles que le soleil, le vent, l'eau, la biomasse et la géothermie [5].

Il est important de noter que la transition vers les énergies renouvelables nécessite des investissements dans les infrastructures et les technologies appropriées, ainsi que des politiques de soutien et des incitations économiques. Cependant, avec les progrès technologiques et une prise de conscience croissante de l'urgence climatique, de nombreux pays et entreprises s'engagent de plus en plus vers un avenir énergétique basé sur les énergies renouvelables [1].

Etant donné que L'Algérie possède un fort potentiel en énergie solaire en raison de son climat ensoleillé et de sa position géographique favorable, la stratégie adoptée actuellement par l'état, encourage l'utilisation de l'énergie solaire décentralisée, notamment pour l'électrification rurale et le pompage photovoltaïque [2].

Le pompage photovoltaïque présente des avantages significatifs en termes d'accès à l'eau, de réduction des coûts d'exploitation, d'autonomie énergétique et de polyvalence. Il contribue à améliorer la durabilité, la résilience et l'efficacité des systèmes d'approvisionnement en eau, tout en réduisant l'impact environnemental. Les systèmes de pompage photovoltaïque peuvent être utilisés pour diverses applications, telles que l'irrigation agricole, l'approvisionnement en eau potable, l'abreuvement du bétail, l'approvisionnement en eau pour les infrastructures publiques, les hôtels ou les installations industrielles. Ils offrent une solution polyvalente et adaptable aux besoins spécifiques de chaque situation [2].

Introduction générale

Dans ce contexte, ce travail s'inscrit dans l'optique de contribuer à l'amélioration des conditions d'accès à l'eau potable en milieu rural dans les localités de la wilaya de souk Ahras.

La présente étude cible la localité El Hnancha comme lieu pilote du projet. Pour cela on va faire le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque pour déterminer les spécifications appropriées de ses composants, afin de fournir une alimentation en eau efficace et fiable à partir de l'énergie solaire.

De ce fait, le présent mémoire est subdivisé en trois chapitres dont le contenu est succinctement résumé ci-dessous :

Le premier chapitre de ce travail correspond à des généralités sur le système de pompage photovoltaïque.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude et au dimensionnement d'un système de pompage solaire photovoltaïque. Dans cette partie on présente les règles de dimensionnement basiques afin de pouvoir vérifier par soi-même l'exactitude de calcul relatif au dimensionnement des différentes parties d'un système de pompage photovoltaïque. Le calcul sera réalisé par un calcul théorique puis, on utilise le logiciel PV-System pour vérifier l'exactitude de dimensionnement.

Pour compléter ce travail, le troisième chapitre représente la modélisation et la simulation du système de pompage photovoltaïque dimensionné dans le chapitre précédent. Des résultats seront donnés pour montrer l'évolution des paramètres de système adopté dans cette région.

Le travail s'achève avec une conclusion générale qui résume l'essentiel de ce travail.

Chapitre I

Généralités sur le système de pompage photovoltaïque

Généralités sur le système de pompage photovoltaïque

I.1. Introduction

L'eau est l'une des ressources essentielles dans notre vie quotidienne, d'autre part son utilité dans les différents domaines tel que, l'irrigation, l'usage domestique ou animal est vital. De plus, il est bien connu que les zones rurales et les agriculteurs souffrent d'un manque important de cette matière. D'autre part, plusieurs régions demeurent non connectées au réseau public d'électricité. Dans le cadre de l'amélioration d'approvisionnement en eau pour l'irrigation ou à l'alimentation domestique, le recours au pompage à petite échelle est l'une des utilisations les plus intéressantes de l'énergie solaire. Généralement, le pompage de l'eau se fait à l'aide d'un groupe motopompes (électriques /mécaniques). Le problème de pompage photovoltaïque est réglé car, l'énergie électrique produite par le système photovoltaïque devient suffisante pour aspirer et refouler l'eau à partir des profondeurs. L'eau est pompée de sa source (puits) et stocker dans des réservoirs ou des bassins, afin de l'utiliser ultérieurement.

Nous aborderons dans ce chapitre l'étude et la connaissance d'un système de pompage photovoltaïque ainsi que les notions sur l'énergie solaire photovoltaïque et son principe de fonctionnement.

I.2. Energie solaire

Ce type d'énergie renouvelable est émis par des rayonnements solaires. On utilise une technologie spécifiques (cellule PV) afin d'absorber cette énergie solaire et de la rediffuser en énergie électrique ou autre énergie selon deux principaux modes de fonctionnement:

- **Solaire photovoltaïque** (panneaux solaires photovoltaïques l'énergie solaire
- **Solaire thermique** (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques)

[3].

I.3. Irradiation solaire

Lorsque la lumière du soleil pénètre dans l'atmosphère terrestre, elle se diffuse en trois parties, une partie est absorbée, une partie est diffusée et une partie se reflète dans l'atmosphère par les nuages. Le reste des rayons du soleil n'est pas affecté par l'atmosphère. Une partie du rayonnement absorbé peut ne pas atteindre la surface, mais augmente la température des particules dans l'air. La partie qui est diffusée est convertie en rayonnement diffus, et la partie qui arrive intacte est appelée rayonnement direct.

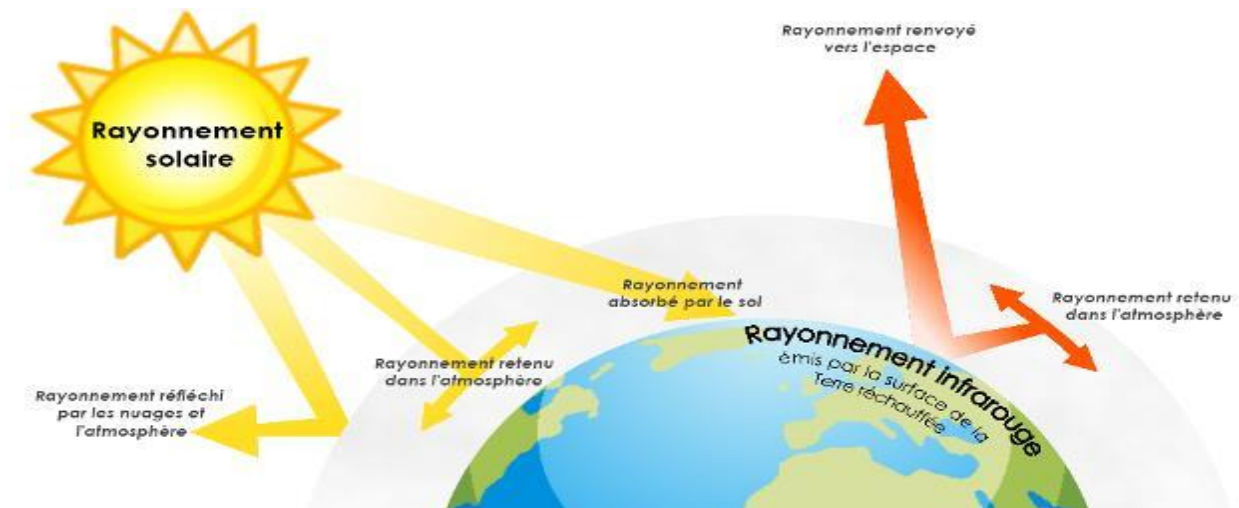


Figure I.1. Le rayonnement solaire [4]

L'intensité du soleil n'est pas constante au cours de la journée, même lorsqu'il n'y a pas de nuages. Dans la matinée, le soleil est bas dans le ciel à l'Est. Il se déplace de façon constante au cours de la journée. À son point le plus élevé, appelé le midi solaire, l'intensité des rayons solaires est également la plus élevée. Si le soleil est directement au-dessus, l'angle zénithal est dit nul. L'après-midi, le soleil se déplace plus loin vers l'Ouest, en abaissant progressivement sa position jusqu'à ce que la nuit tombe. Les rayons auront à parcourir une distance plus ou moins longue avant d'atteindre la surface de la terre, selon que l'on se trouve plus au Nord ou plus au Sud de l'équateur. Quand le soleil est à son point de zénith la distance à travers l'atmosphère est $AM = 1$ (longueur minimale). Lorsque l'angle est de $60,1$ degrés, ce chemin devient deux fois plus long et $AM = 2$. Lorsque ce chemin est long une plus grande partie de la lumière solaire est absorbée et dispersée. Cela réduit la puissance du soleil : le matin et le soir. Lors du déplacement Sud / Nord, l'angle sous lequel les rayons du soleil frappent la surface devient plus grand. Par conséquent, les rayons de soleil se répandent sur une surface horizontale plus large et réduisent l'effet de réchauffement du soleil sur la surface de terre.

Cependant, on peut donner au panneau solaire une position inclinée, pour faire face directement au soleil [4].

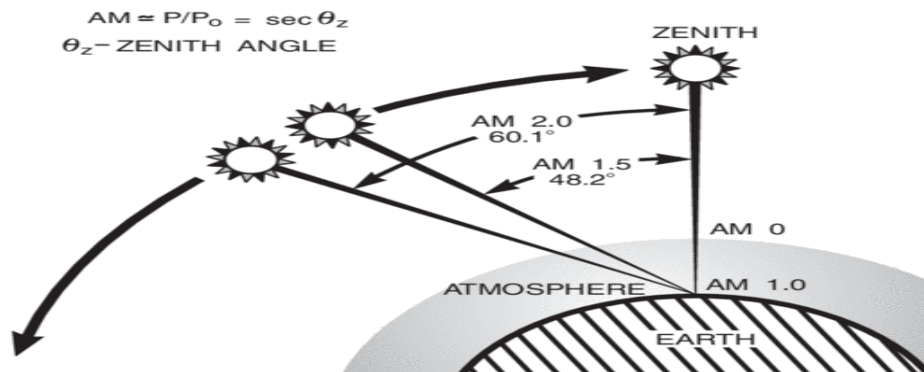


Figure I.2. Angle de zénith et "Air Mass" (AM)

I.4. Effet photovoltaïque

Les rayonnements solaires (lumière) contiennent des photons qui délivrent une forme d'énergie. Quand une cellule solaire photovoltaïque est soumise à ce rayonnement, cette énergie libère des électrons des semi-conducteurs de la cellule. Ces électrons se déplacent alors de proche en proche à l'intérieur du matériau semi-conducteur. C'est ce mouvement des électrons libérés qui produit le courant électrique capté par des fils conducteurs d'électricité vers l'extérieur de la cellule et l'on peut utiliser l'énergie fournie. Ce processus de conversion de lumière en électricité est appelé l'effet photovoltaïque [5].

I.4.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

En total, une cellule solaire est une diode semi-conductrice à grande surface. Elle se compose d'une jonction P-N Créé par un dopage. La région-N est créé en injectant les impuretés avec le silicium qui sont des atomes de phosphore ayant cinq électrons externes, seuls quatre électrons sont nécessaires qui s'adaptent à l'Atome de silicium, le cinquième électron demeure libre. Ainsi, dans cette région du cristal à une majorité de charges négatif libre, Ces électrons sont appelés des « porteurs ». Pour la région P: par Dopage le cristal avec des atomes de bore, qui n'ont que trois électrons externes, Un électron est toujours manquant pour une liaison complète dans le cristal. Cet électron manquant pourrait être « emprunté » aux atomes voisins, donc le lieu de l'électron manquant est décalé qui vas laisser comme on l'appelle un « trou », ce déplacement provoquera une majorité de charge positive. En raison des différences entre les deux régions, les électrons« porteurs » se diffusent dans les régions

p et les «trous» en n-régions, Par conséquent, un champ électrique dans la jonction neutre anciennement électrique vient augmente jusqu'à ce qu'une autre diffusion pratique des porteurs soit évitée par elle [6].

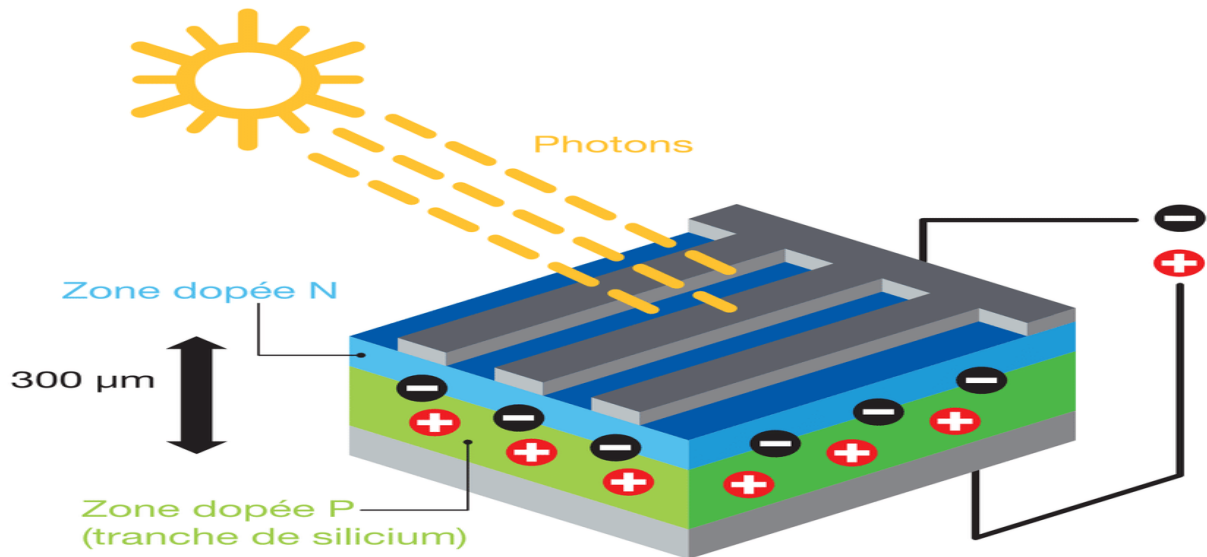


Figure I.3. Schéma d'une jonction PN

I.4.2. Les différents panneaux solaires

I.4.2.1. Panneau solaire photovoltaïque

Les panneaux solaires ou (générateurs photovoltaïques) sont constitués de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle pour produire de l'électricité requis. Ces modules sont installés sur des support spéciaux destinés à soulever les panneaux solaires avec des angles d'inclinaison spécifiques [7].

➤ Types de panneaux photovoltaïques

Actuellement deux types de panneaux photovoltaïques courants dans le marché :

a) panneau à surface plane : le plus utilisé, il est formé par un alignement de cellule connectées entre-elles et rassemblées sur un cadre plat qui reçoit les rayonnements solaires, ce système est simple à réaliser mais sa constitution est basée sur une grande quantité de semi-conducteur

b) panneau à concentration : un système comporte des surfaces de miroirs ou lentilles parabolique qui vas permettre de concentrer les rayonnements solaire sur de petites surfaces, il requiert moins quantité de matériel semi-conducteur mais ce dernier est sophistiqué du suivi du soleil qui lui rend couteux [5].



a) panneau solaire à surface plane

b) panneau solaire à concentration (parabolique)

Figure I.4. Panneau solaire à surface plane et panneau solaire à concentration (parabolique)

I.4.2.2. Panneau solaire thermique et thermodynamique

- **Domestique (thermique)**

Le principe du système est l'utilisation d'un fluide caloporteur. Les panneaux sont exposés au soleil. Ce fluide transfère sa chaleur à l'eau pour une utilisation dans les échangeurs de chaleur domestiques [8].

- **Industriel (thermodynamique)**

Les centrales thermiques sont utilisées pour convertir l'énergie du rayonnement solaire en énergie thermique à haute température. L'eau chauffée par la température est transformée en vapeur, qui est envoyée à la turbine. Par la suite la turbine entraîne l'alternateur pour produire de l'électricité [9].

I.4.3. Les différents types des cellules photovoltaïques

Il existe trois types de cellule photovoltaïque suivant :

- **Les cellules monocristallines**

À un excellent rendement (12-16%) par contre c'est une cellule qui nécessite beaucoup d'énergie pour la produire ce qui le rend difficile à fabriquer et très coûteuse.

- **Les cellules poly cristallines**

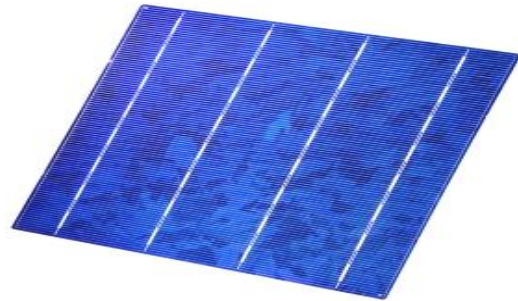
C'est une cellule qui a un rendement (13% - 20%), son obtention nécessite moins d'énergies.

- **Les cellules amorphes**

C'est la cellule la plus mauvaise de fait de son faible rendement (8-10%) et une production plus basse. De plus sa durée de vie plus faible.



a) Cellule de silicium monocristallin



b) silicium poly cristallin

Figure I.5. Les différents types des cellules photovoltaïques

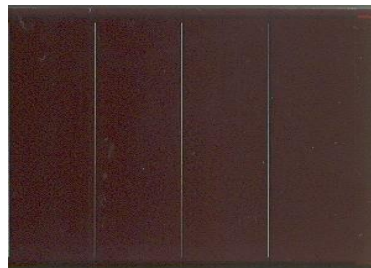


Figure I.6. Cellule en silicium amorphe

I.4.4. Circuit électrique équivalent

Le schéma ci-dessous est le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque qui comprend un générateur de courant modélisant l'éclairement, une diode en parallèle qui modélise la jonction PN et des résistances en série et en parallèle qui tiennent en compte de l'effet résistif des parasites dus à la fabrication.

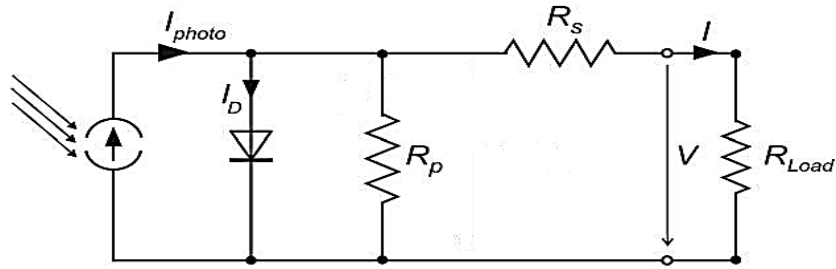


Figure I.7. Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire

I.4.5. Caractéristique des cellules photovoltaïques

Si les deux électrodes de la cellule sont en court-circuit, un courant fait naissance qui correspond à la photo courant I_{ph} généré par le rayonnement. Ce courant est proportionnel à la surface de la cellule photovoltaïque et l'irradiation, il passe dans le circuit extérieur

- Si la cellule photovoltaïque est en circuit ouvert sous un rayonnement, une tension entre les électrodes fait naissance à une tension de circuit ouvert V_{co} , et aussi elle est la tension qu'il faudrait fournir à la diode pour passer un courant I_d
- On plaçons une charge aux borne de la cellule, le photo courant se divise et se distribue à l'extérieur (courant I) et à la diode (I_d) qui résulte une tension V inférieur a la tension ouverte V_{co} .

$$I = I_{ph} - I_d [10]$$

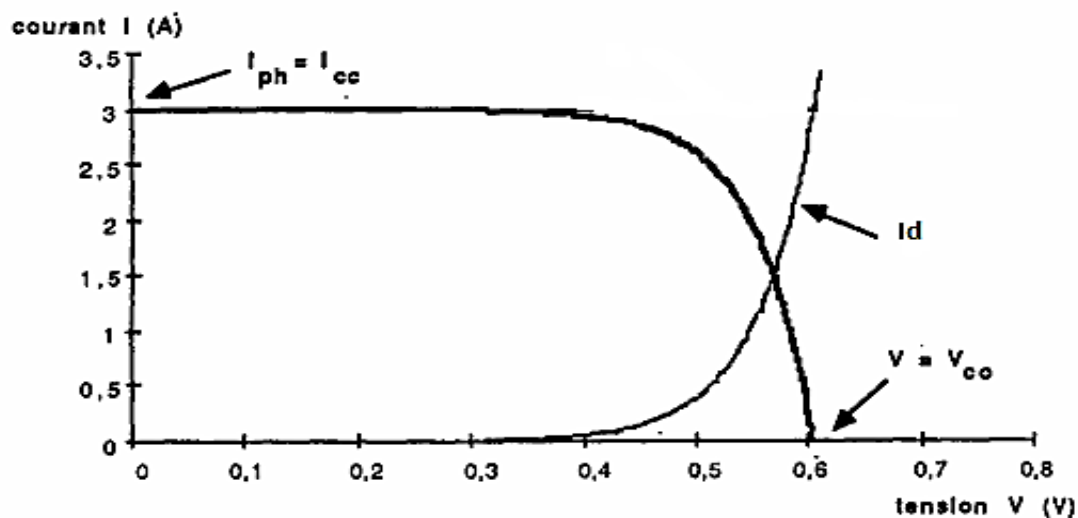


Figure I.8. Caractéristique $I=F(U)$ ($1kWm^{-2}$, $1.5 AM$, $25 C^{\circ}$) [10]

I.4.5.1. Influence des paramètres climatiques

➤ Influence de l'irradiation

La production photovoltaïque dépend directement de l'intensité de rayonnement reçu. Irradiation va modifier cette caractéristique, non dans sa forme générale mais pour ses valeurs (I_{ph} , V_{co}). On constate que le courant est proportionnel à les niveaux du rayonnement, cela n'implique pas la même chose pour la tension car elle est moins affectée quand la lumière se dégrade et sa à cause de la résistance shunt qui reste assez élevée [11].

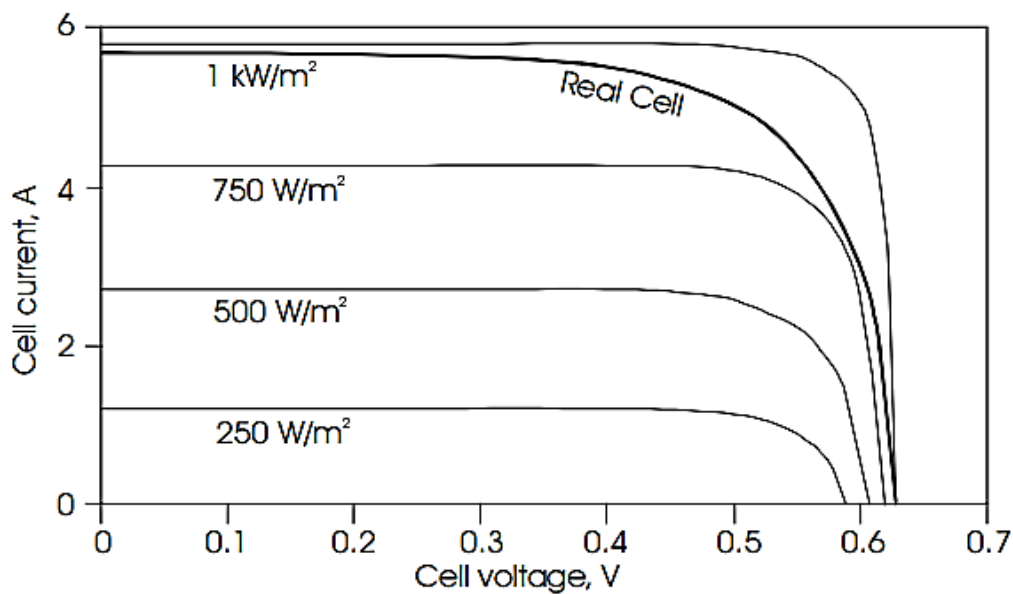


Figure I.9. Caractéristiques des cellules photovoltaïques sous différents niveaux d'éclairement [6]

Si le courant de cellule est connu dans des conditions de test standard le matin, alors le courant de cellule à toute autre irradiation G , est donné par $G_0 = 1 \text{ kW/m}^2$

$$I_{ph}(G) = \left(\frac{G}{G_0} \right) I_1(G_0) . \quad (\text{I.1})$$

➤ Influence de la température

La température a un impact direct sur les performances des cellules photovoltaïques et par conséquent sur la production des systèmes. En effet, la tension diminue avec l'augmentation de la température par contre le courant reste fixe [12].

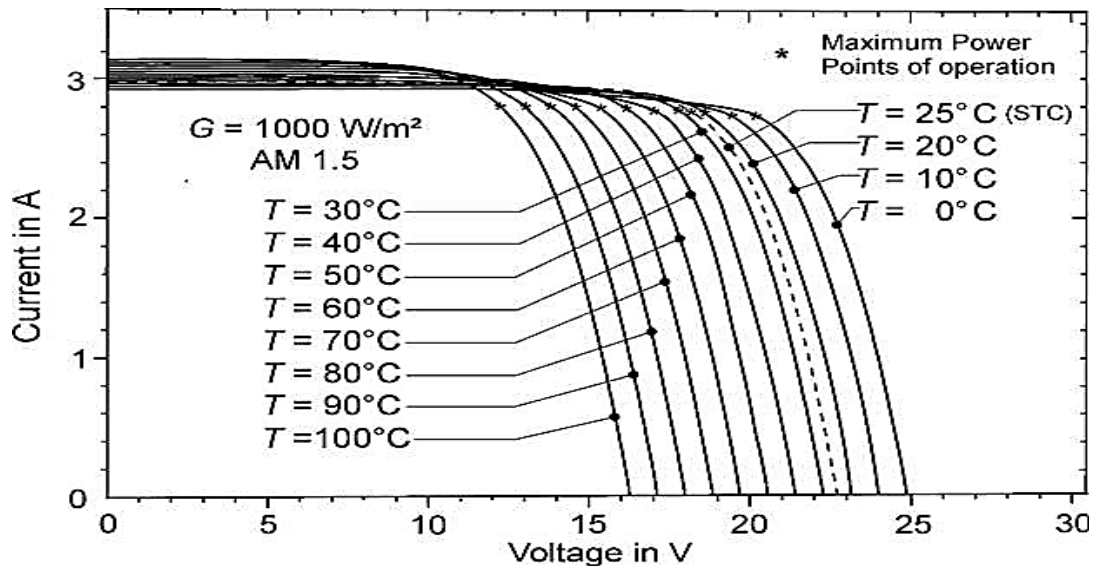


Figure I.10. Caractéristiques des cellules photovoltaïques multi cristallin aux variations de température (irradiation 1 000 W/m²) [12]

La tension du circuit ouvert de la cellule est déterminée par l'équation suivante:

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln \frac{I_{ph} + I_d}{I_d} = \frac{KT}{q} \ln \frac{I_{ph}}{I_d} \quad (I.2)$$

q : charge d'électron égale à 1.6x10⁻¹⁹C

K : constant 1.38x 10⁻²³ J/K

T : la température de la cellule en Kelvin.

I.4.5.2. Puissance max, Facteur de puissance et le Rendement

➤ Puissance max

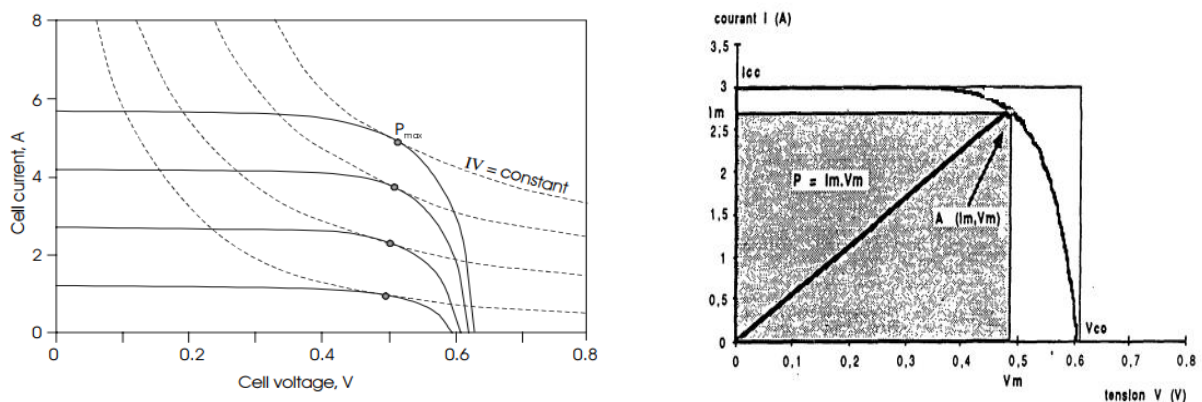


Figure I.11. Détermination du point de puissance maximale sur une caractéristique de fonctionnement d'une cellule PV [12]

Une cellule est caractérisée aussi par une puissance maximale, un point réferer dans la caractéristique I-V ou la cellule produit le maximum de puissance, il peut être obtenu en traçant un ensemble d'hyperboles définie comme $I \cdot V = \text{constant}$ qui est tangentielle a la courbe caractéristique en ce point. Le point de fonctionnement max est fixé uniquement par le courant demandé par la charge et la tension dépend de la température et l'éclairage.

$$P_m = I_m V_m = FF I_{ph} V_{OC} \quad (\text{I.3})$$

- **Le facteur de puissance** : C'est un rapport entre la puissance maximale sur la valeur de la puissance extraite par le produit $I_{ph} V_{co}$.

$$FF = \frac{P_m}{I_{ph} V_{oc}} \quad (\text{I.4})$$

Rendement : C'est le rapport entre la puissance maximale et l'intensité de l'irradiation φ capté de la surface S de la cellule

$$\eta = \frac{P_m}{\varphi S} \quad (\text{I.5})$$

I.5. Méthodes de pompage photovoltaïque

Dans les systèmes de pompage photovoltaïque, nous avons deux techniques possibles :

- Pompage au fil du soleil
- Pompage avec stockage d'énergie

I.5.1. Pompage au fil du soleil

Dans le cas où l'énergie solaire est consommée en temps réel, on parle alors d'un pompage au fil du soleil sans batterie (Fig.I.12). Cette technique permet d'utiliser directement une puissance continuellement variable, celle est issue des modules photovoltaïques. Le débit de pompage va donc évoluer avec l'intensité de l'ensoleillement, C'est le cas que nous allons étudier [13].

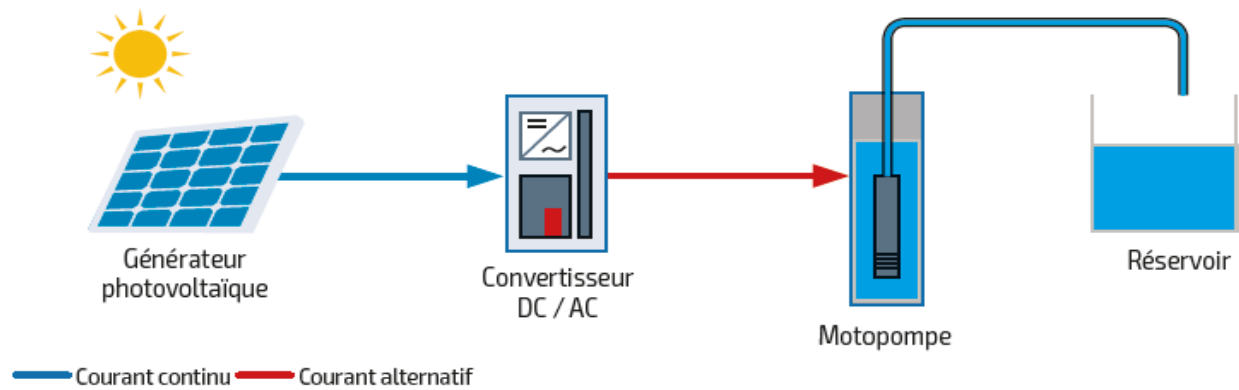


Figure I.12. Schéma du principe de pompage au fil du soleil.

I.5.2. Pompage avec stockage d'énergie.

La deuxième technique consiste à utiliser un stockage d'énergie cette fois-ci, via des batteries (pompage avec batterie). Ces batteries stockent l'énergie produite par les cellules photovoltaïques lors des périodes d'ensoleillement afin de pouvoir restituer cette énergie pour pomper l'eau en temps voulu. Le débit de pompage peut se faire à la demande, lorsque les utilisateurs en ont besoin [14].

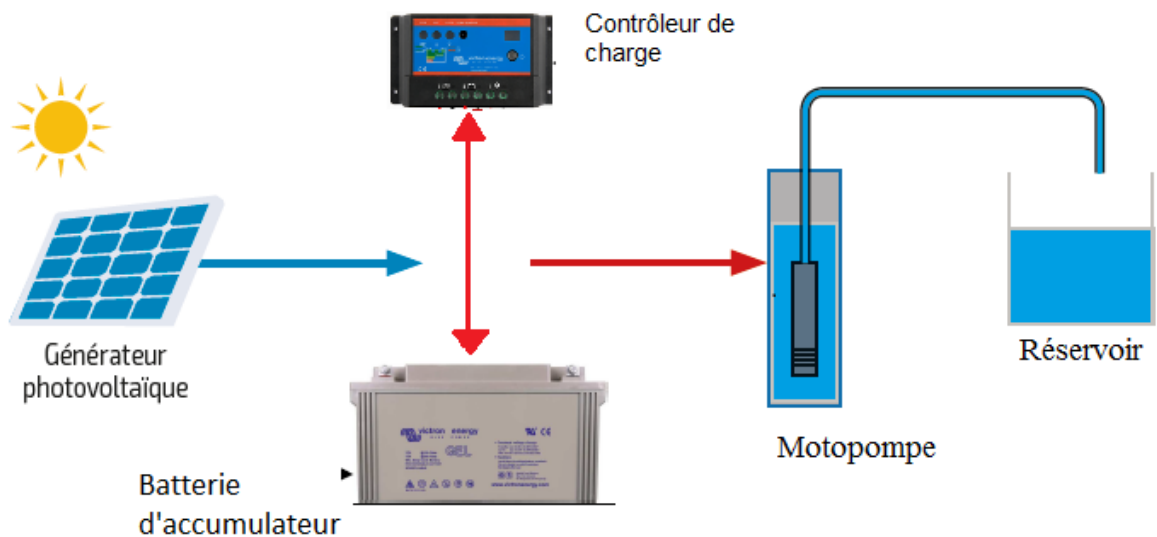


Figure I.13. Schéma du principe de pompage avec stockage d'énergie.

I.6. Constitution d'un système de pompage photovoltaïque (au fil du soleil)

I.6.1. Générateurs photovoltaïques

C'est un système de connexion des éléments basé sur les modules photovoltaïques, ils se connectent en série et parallèle afin d'augmenter les performances (courant, tension). Cet ensemble de modules appelé aussi champs photovoltaïques qui vas fournir de l'énergie électrique pour diverses utilisation [15].

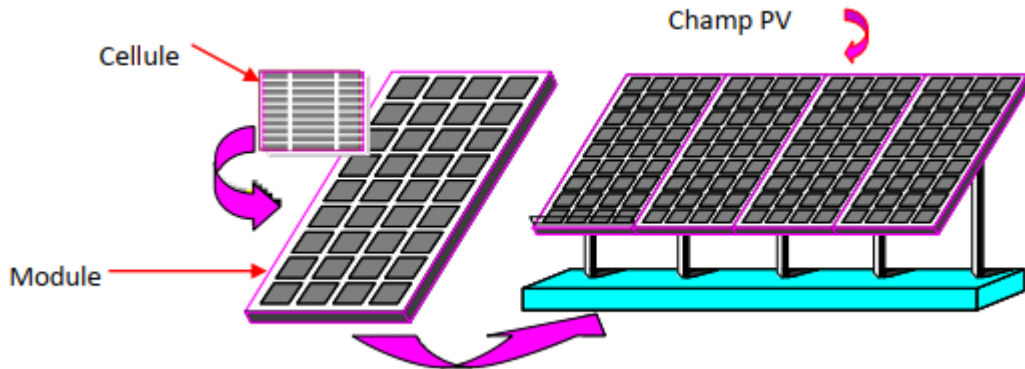


Figure I.14. Composantes d'un champ de modules photovoltaïques

I.6.2. Le module photovoltaïque

Le module est un groupe de cellules photovoltaïques brancher à leur tour en série et en parallèle pour objectif d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. On note que la caractéristique courant-tension d'un regroupement de cellules photovoltaïques est symétrique aux courbes courant-tension d'une cellule. En conséquence tout ce qui a été dit pour une cellule individuelle reste valable pour un module [8].

I.6.2.1. Groupement en série

En branchant des cellules en série, cela vas impliquer une augmentation à la tension de plus en plus avec le nombre de cellules en série et garde le courant le même qui traverse la branche. Il est important que les cellules sont identiques et non-ombragées pour éviter la diminution de la tension et tout problèmes [15].

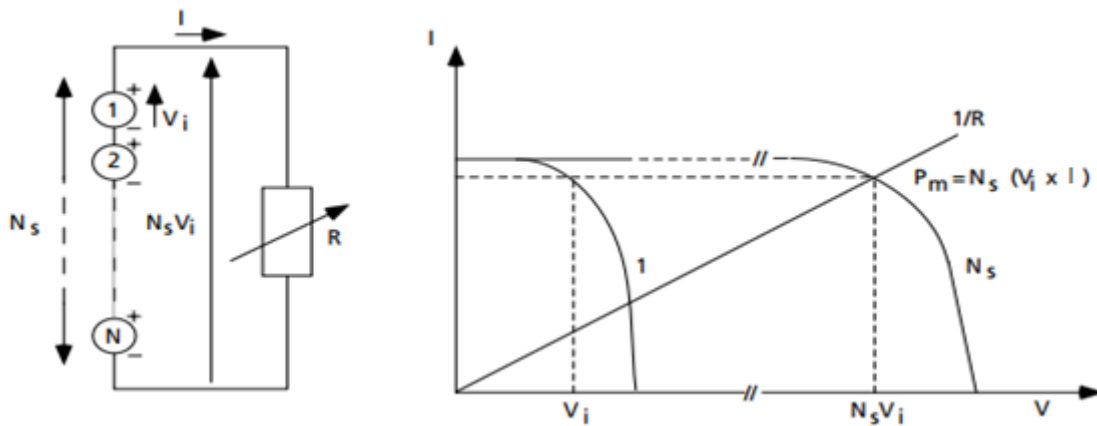


Figure I.15. Groupement de cellules en série et l'influence sur la tension [10]

I.6.2.2. Groupement en parallèle

En branchant en parallèle la tension de chaque branche sont égaux par contre l'intensité augmente avec l'augmentation au nombre de cellule en parallèle dans la branche. Il est important aussi que les cellules soit identiques pour éviter tout problèmes en relation avec l'intensité [15].

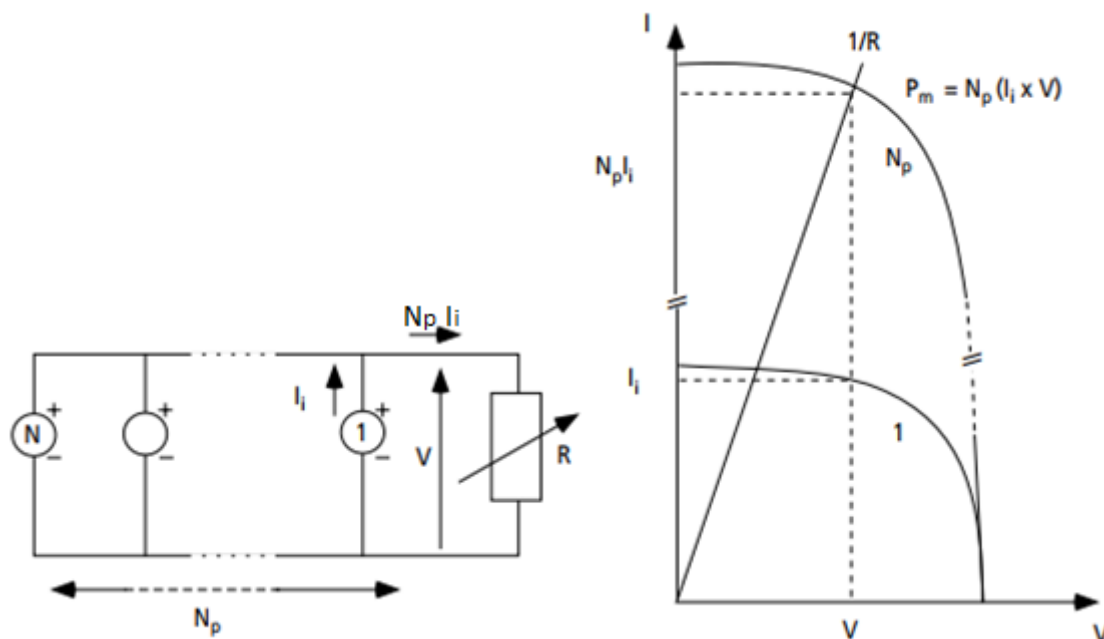


Figure I.16. Groupement des cellules en parallèle et l'influence sur le courant [10]

I.6.2.3. La protection du module PV

- La cellule s'échauffe pendant le fonctionnement ce qui la dégrade et la détruit et fait naissance à un déséquilibre, ce dernier provoquer par la tension inverse maximale qui

susceptible. Cela convient de placer une diode parallèle (by-pass) au niveau de chaque module qui va limiter la tension maximale développée au sein de la cellule avec sa tension directe.

- Quand quelques cellules d'un module sont ombrées, le courant produit sera de moins en moins faible, et si la charge est élevée et supérieure à la performance du module une dissipation de puissance qui devient dangereuse au niveau de la plus faible cellule. Afin d'empêcher ce gaspillage dans le module, on branche une diode anti-retour en série avec le module, cette protection est valable si la chute de tension provoquée par la diode est très petite devant la tension produite par le module alors elle peut être négligée [15].

I.6.3. Les convertisseurs (DC/AC)

Le convertisseur c'est un appareil qui convertit la forme de tension, que ce soit de continu à alternatif ou l'inverse

Il existe plusieurs convertisseurs pour effectuer cette opération parmi eux (hacheur, boosteur, onduleur, etc.), mais le plus utilisé dans le pompage de l'eau est l'onduleur.

I.6.3.1. Les onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique qui assure la conversion de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En réalité, cette conversion d'énergie est réalisée par un dispositif de commande qui envoie des signaux de commande aux semi-conducteurs composant l'onduleur. Ce convertisseur donne accès à un système de tension alternative à fréquence variable et à valeur réglable qui est situé dans les bornes du récepteur.

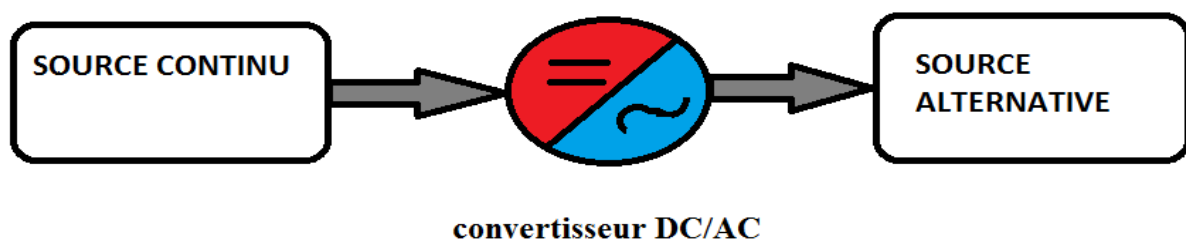


Figure I.17. Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC - AC)

I.6.3.2. Types d'onduleurs

➤ Onduleur non autonome

Ce type de circuit désigne les convertisseurs à thyristors qui ont une transmission naturelle assistée par le réseau auquel ils sont connectés, permettant l'inversion l'énergie (par exemple, en récupérant de l'énergie lors d'un freinage électriquement propulsé).

➤ Onduleur autonome

Ce type de circuit désigne les convertisseurs qui convertie l'énergie à courant continue en énergie à courant alternative. Dans ce cas l'onduleur obtenu est appelé autonome. Dans ce convertisseur, nous exerçons une autorité sur la gestion des semi-conducteurs (Thyristors GTO, transistor en régulant leur commutation. Ces onduleurs autonomes peuvent être classés en de deux types :

- Les onduleurs de tension fonctionnent avec une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant fonctionnent avec une source de courant continue.

I.6.3.3. Les application des onduleurs

Les onduleurs de tension triphasés sont utilisés souvent dans des applications suivantes :

- Les applications à fréquence fixe qui réalisé
 - une alimentation de sécurité et alimentation de secours
 - connecte avec un générateur DC
 - redressement MLI
- Les applications à fréquence variable correspondent aux entraînements à vitesse variable par moteurs synchrones ou asynchrones [16].

I.6.3.4. Onduleur de tension

L'onduleur utilisé dans ce système est un onduleur de tension triphasé à six commutateurs avec une commande on ou off ; ce sont des transistors de type IGBT qui sont placer avec des diodes en antiparallèle. L'onduleur se compose alors de trois bras décalés l'un par rapport à l'autre de 120°. De plus les semi-conducteurs de même bras sont décalés de 180°, cad ils travaillent d'une manière complémentaire. La séquence de commutation des interrupteurs dépend de la commande à utiliser (commande pleine onde, commande MLI) [17]. La structure de l'onduleur de tension est illustrée sur la figure I.18.

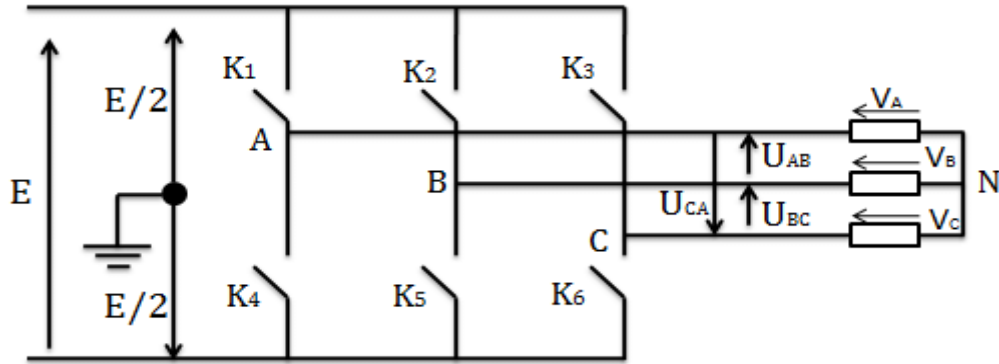


Figure I.18. Onduleur triphasé

I.6.3.5. Type de commande d'onduleur

➤ **Commande 180°**

Dans la commande à 180°, la durée de chaque interrupteur est d'une demi-période. Selon le tableau (I.1), lorsqu'un interrupteur d'un bras se ferme, l'autre interrupteur du même bras s'ouvre simultanément. La commande des interrupteurs sur deux bras différents est décalée de 120°. [18].

Tableau I.1. Commande de 180° [19].

Q1		Q1'		Q1	
Q2'	Q2		Q2'	Q2	
Q3	Q3'		Q3	Q3'	

➤ **Commande 120°**

Chaque interrupteur dans la commande à 120° est géré pendant un tiers de période, conformément au tableau (I.2). La fermeture de l'interrupteur n'empiète pas sur l'ouverture d'un autre interrupteur située sur le même bras. La commande des interrupteurs de deux bras différents est décalée de 120° [18].

Tableau I.2. Commande de 120° [19].

Q1		Q1'		Q1	
Q2'		Q2		Q2'	Q2
	Q3'		Q3		Q3'

➤ Commande d'un onduleur par MLI

Il s'agit d'une méthode de contrôle spéciale de l'onduleur. Son principe repose sur la tension coupée par l'action de l'interrupteur inverseur, en plusieurs fentes de différentes largeurs MLI. Cette opération a un double but :

- Modifier le contenu harmonique de la tension tout en conservant sa période, pour repousser les harmoniques à un niveau supérieur, aidant ainsi à réduire les le taux de distorsion de la tension de sortie.
- Permet le réglage de la valeur efficace de la tension de sortie, qui est indispensable pour le contrôle des systèmes électriques [20].

I.6.3.6. Les types de commande en MLI

Un grand nombre de stratégies de contrôle de modulation de largeur d'impulsion MLI, sont utilisés dans l'industrie ou traité dans les travaux de recherche. Les techniques MLI se déferent l'une par rapport à l'autre selon l'objectif et selon les exigences techniques. A titre d'exemple on peut citer quelques critères de choix [17] :

- Spectre harmonique minimal
- La plage de variation maximale de l'amplitude de sortie
- Facile à installer et à développer
- coût abordable
- Facile à régler l'amplitude et la fréquence de l'onde de sortie.

Les modes de contrôle peuvent être classés selon quatre grandes catégories :

- Modulation sinus triangle
- Modulation calculée : les temps de commutation sont pré calculés selon un Les critères d'optimisation sont alors stockés en mémoire. Lire pour ces moments utilise la

mémoire Microprocesseur, Assurez la génération du signal de commande de l'interrupteur.

- Modulation par l'harmonique 3
- Modulation vectorielle :

Dans la suite de ce travail, nous nous concentrerons sur la technique MLI sinus triangle pour commander l'onduleur.

I.6.3.7. MLI sinus-triangle

Le MLI sinus-triangle est obtenu en comparant une onde de modulation basse fréquence (tension de référence sinusoïdale) à une porteuse haute fréquence triangulaire. Les points d'intersection entre la porteuse et la référence nous donnent les 'instants de commutation des interrupteurs. En triphasé, le déphasage des trois signaux sinusoïdaux de référence est égal à

$$\frac{2\pi}{3} \text{ rad [17].}$$

I.6.4. Group moto pompe

Un group moto pompe est constitué par un moteur électrique entraînant une pompe hydraulique, ce groupe peut être utilisé dans un système mobile. Généralement ce groupe est composé de :

- Moteur
- Pompe



Figure I.19. Group motopompe

I.6.5. Moteur

Le moteur est une machine électrique permet la conversion d'une énergie électrique vers la énergie mécanique.

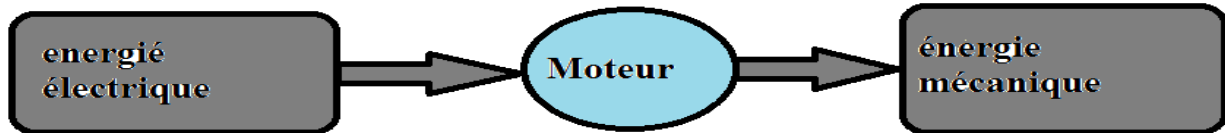


Figure I.20. Schéma de principe de la conversion par moteur électrique

I.6.5.1. Différent type de Moteurs

Généralement plusieurs moteurs électriques peuvent être utilisés. On peut les classer en deux catégories : les moteurs à courant continu est les moteurs à courant alternatif.

➤ **Moteur à courant continu**

L'énergie électrique appliquée à un moteur est transformée en énergie mécanique en inversent le sens du courant continu circulant dans un induit (le rotor) soumis à un champ magnétique produit par un Inducteur (le stator). La commutation du courant dans le rotor d'un moteur à courant continu ce fait à partir de balais composés de charbon et de graphite ou par commutation électronique. Les moteurs nécessitent une maintenance ou les balais doivent être changés de temps en temps. Ceci constitue l'une des problématiques dans le cas des motopompes immergé où la pompe doit être retirée du forage pour changer les balais. De plus, l'isolation du moteur ne doit pas être compromise afin de ne pas la fragiliser aux infiltrations d'eau, Ce qui n'est pas préférable sur le site. Certains moteurs sont offert à balais de longue durée, réduisant donc cet entretien à toutes les 5 000 heures de fonctionnement [15].

➤ **Machine asynchrone (alternatif)**

Les moteurs électriques les plus utilisés aujourd'hui dans l'industrie sont les moteurs à induction (asynchrones). Son principal avantage est l'absence de contacts électriques glissants, d'où une construction directe, robuste et simple.

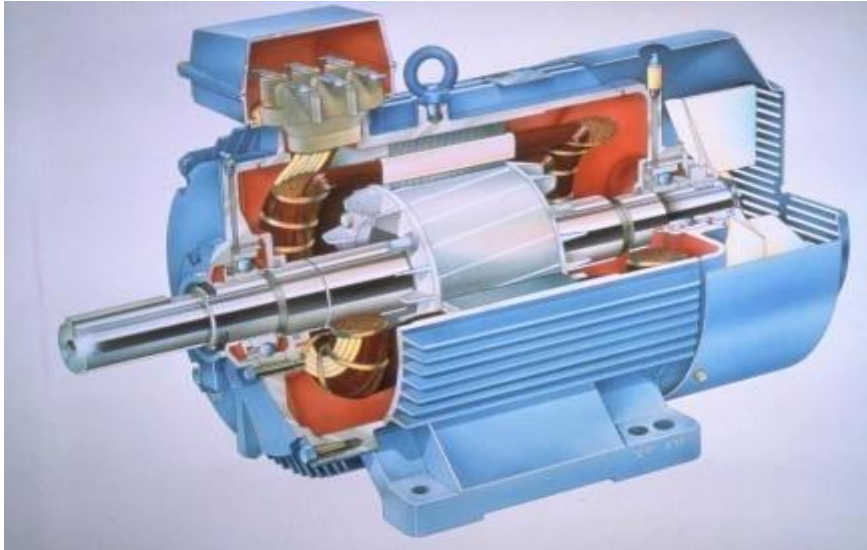


Figure I.21. Machine asynchrone triphasé

➤ **Constitution de la machine asynchrone**

Le moteur asynchrone est constitué par :

a) Le stator

Le stator d'un moteur asynchrone est le même que celui d'un moteur synchrone (MS), qui comporte trois enroulements, couplés en triangle ou en étoile, divisés par deux tiers, et alimentés par un système à tension triphasé et équilibré.

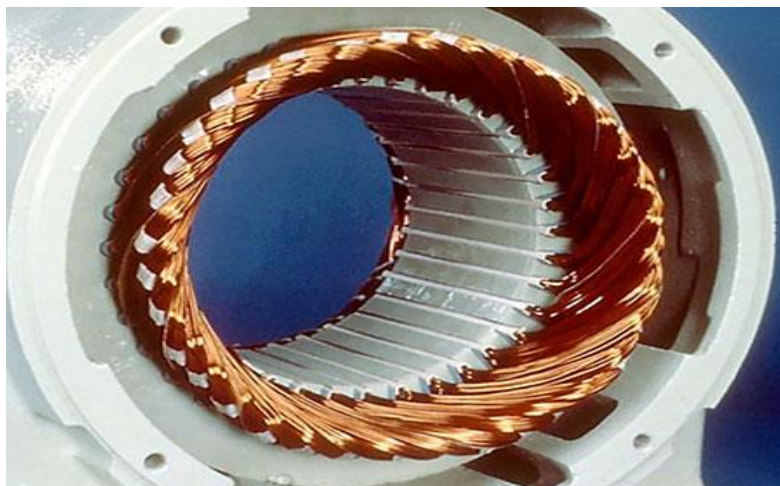


Figure I.22. Stator d'une machine Asynchrone

b) Le rotor

Deux types de rotor existent : le rotor en court-circuit et le rotor bobiné.

Le rotor bobiné est composé d'un bobinage qui est triphasé et divisé par deux tiers pour soutenir le même nombre de pôles. Ces trois bobines sont couplées en étoiles. Cette forme de rotor est appelée bobiné Figure I.23,

Le deuxième type est appelé le rotor à cage d'écureuil ou rotor en cours circuit. Il est composé de barres conductrices qui sont court-circuités par des anneaux de court-circuitage fabriqué en aluminium ou en cuivre Figure I.24.

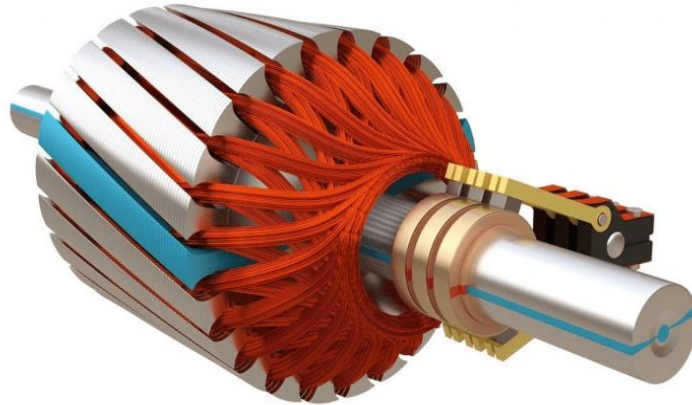


Figure I.23. Rotor bobiné de la machine asynchrone



Figure I.24. Rotor à cage d'écureuil de machine asynchrone

I.6.6. Les pompe

La pompe est un appareil qui transforme l'énergie mécanique (couple et vitesse), en énergie hydraulique (débit et pression). Elle est utilisée dans des forages et les puis choisie selon la hauteur manométrique que devra fournir la pompe pour faire le fonctionnement [21].

I.6.6.1. Différents types des pompes

Les pompes à eau sont classées en deux types et chacun à son principe de fonctionnement, on les distingue :

- Type volumétrique
- Type centrifuge

De plus il y a également deux autres types secondaires qui sont lié à l'emplacement physique :

- Pompe à aspiration: placer à une hauteur (inférieur à 7mètre pratiquement)
- Pompe à refoulement: qui est immergées sous l'eau [15].

➤ La pompe volumétrique

Soumit un volume de fluide à un mouvement va-et-vient, par conséquence crée une variation successives du volume reliée alternativement à l'ouverture d'aspiration et l'ouverture de refoulement ce qui provoque une dépression donnant un déplacement du fluide. Les pompes volumétriques incluent les pompes à vis, les pompes à palettes, les pompes à piston et les pompes à diaphragme. Les deux derniers types sont utilisés dans les puits ou les forages profonds (plus de 100 mètres). L'entraînement est habituellement assuré par un arbre de transmission très long, à partir d'un moteur électrique monté en surface. Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur. Mais son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale (HMT) et est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur. La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont souvent utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau. On les utilise parfois comme pompes de surface lorsque le couple est lent et irrégulier et que le débit demandé est faible, par exemple pour les pompes à main et les pompes éoliennes multiples [15].

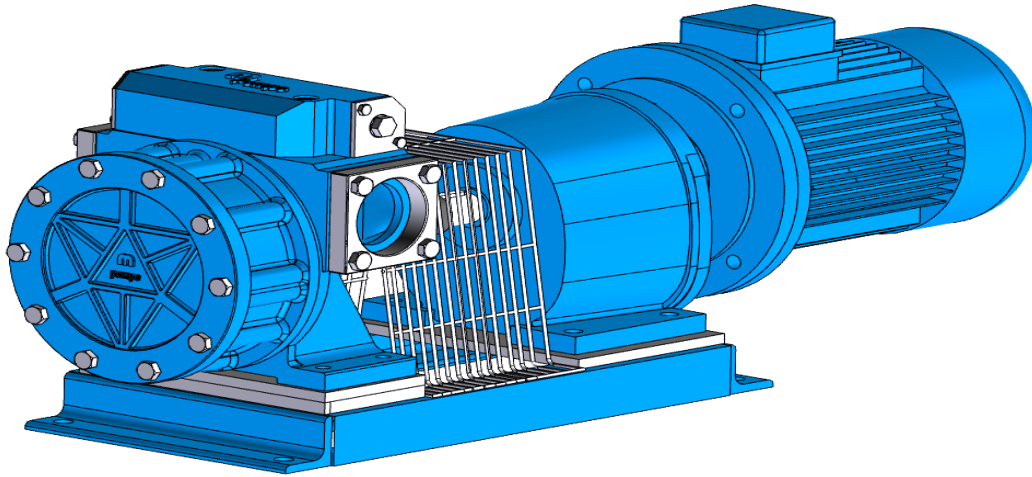


Figure I.25. Pompe volumétrique série M

➤ **Les pompes centrifuges**

Les pompes centrifuges sont les plus courantes dans le domaine du pompage à eau. Ils sont couplés à des moteurs asynchrones formant un groupe moto pompe électrique [17].



Figure I.26. Pompes centrifuges

La pompe centrifuge est conçue pour une HMT relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportionnellement à la vitesse de rotation du moteur avec un couple qui augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement, ce qui nécessite une vitesse de rotation très rapide pour assurer un bon débit. La puissance consommée, proportionnelle à Q et HMT, variera donc dans le rapport du cube de la vitesse. On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou

faibles (10 à 100 mètres). Parce que le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle (qui est plus important qu'en rotation), la pompe requiert une vitesse minimale à une HMT donnée pour obtenir un débit de départ non nul.

Le rendement de la pompe centrifuge est fonction du débit ; elle fonctionne de façon plus efficace à une certaine HMT et à une vitesse de rotation prédéterminée. Il est donc important de bien concevoir le dimensionnement de la pompe selon les conditions du terrain [15].

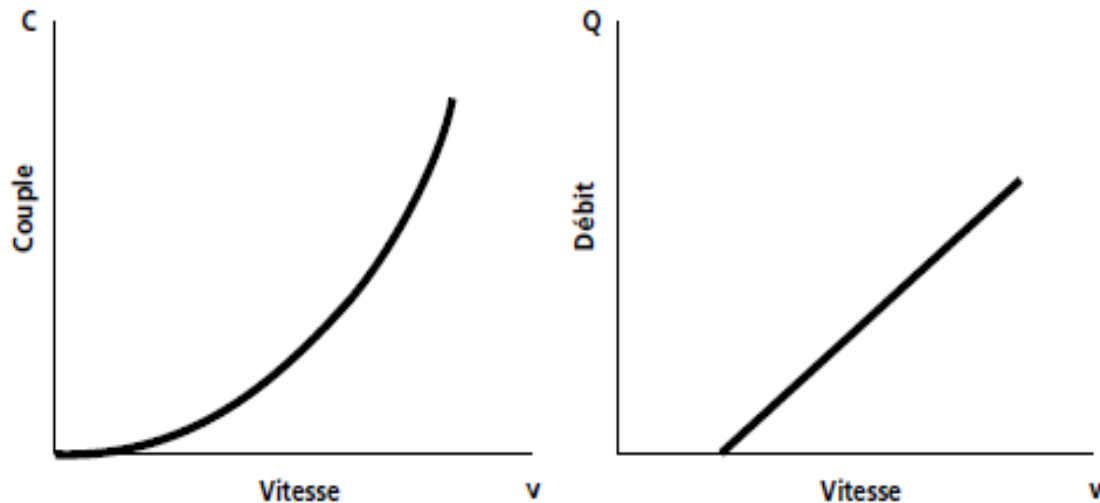


Figure I.27. Caractéristiques d'une pompe centrifuge [15]

La puissance transmise au fluide par la pompe est donnée par :

$$P = Q \cdot \rho \cdot H \cdot 9,81 \quad (\text{I.6})$$

Avec :

P : Puissance transmise au fluide par la pompe en Watt.

Q : débit en m³/s.

ρ: masse volumique du liquide en kg/m³.

H : hauteur de charge en mètre.

9.81 : Intensité moyenne de la pesanteur [22].

-La puissance mécanique nécessaire à une pompe est toujours supérieure à l'énergie transmise au fluide, suite aux différents frottements des organes de rotation.

$$P_{mec} = \frac{P_{fl}}{R_v \times R_T} \quad (\text{I.7})$$

Avec :

P_{mec} : Puissance mécanique nécessaire à la pompe.

P_n : Puissance transmise au fluide.

R_v : rendement mécanique du ventilateur.

R_T : rendement de la transmission [22].

Les pompes centrifuges sont très utilisées pour les applications avec énergie photovoltaïque parce que le moteur peut fournir une vitesse de rotation rapide à peu près constante. De plus, l'exhaure de l'eau domestique se fait traditionnellement à partir de puits, à des profondeurs de 10 à 50 mètres, qui conviennent bien aux pompes centrifuges à étages multiples. Ces pompes peuvent également s'adapter à de petits forages, ce qui permet de capter les nappes phréatiques profondes qui ont souvent un niveau d'eau dynamique entre 30 et 100 mètres.

Les pompes centrifuges immergées possèdent plusieurs caractéristiques à savoir :

- Son diamètre est soit de 4" (95 mm), soit de 6" (142 mm). Le Corps de pompe est en acier inoxydable, les roues et les diffuseurs Étant soit en acier inoxydable, soit en matériau synthétique. Ces Matériaux présentent une très bonne résistance à l'abrasion. Le corps d'aspiration est protégé par une crépine contre les grosses impuretés (> à 3mm). Un clapet anti-retour est intégré à la tête de pompe, qui est taraudée pour le raccordement au tuyau de refoulement. La lubrification est assurée par l'eau pompée.
- Le nombre d'étages est lié à la hauteur manométrique totale de refoulement.
- Le type d'aubage de chaque étage est lié à la puissance hydraulique à fournir pour la HMT nominale.
- Les rendements hydrauliques des pompes solaires sont élevés (utilisation de technologies de pointe). Ils sont de l'ordre de 55% à 60 % au point de fonctionnement nominal.
- La durée de vie peut être estimée entre 5 et 7 ans (elle est fortement liée à la qualité de l'eau).
- L'entretien courant consiste au nettoyage des étages (boue, sable, déchets si la pompe est installée dans un puits). La fréquence de celui-ci dépend de la qualité de l'eau pompée [15].

I.6.6.2. Caractéristiques des pompes volumétriques et centrifuges

Le tableau I.3 donne les caractéristiques des pompes volumétriques et centrifuges

Tableau I.3. *Caractéristiques des pompes volumétriques et centrifuges* [14].

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

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un aperçu sur l'énergie solaire et en particulier, son utilisation dans un système de pompage photovoltaïque. Le prochain chapitre sera consacré au dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque avec une étude de cas.

Chapitre II

Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque

Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque

II.1. Introduction

Les pompes solaires photovoltaïques sont de plus en plus employées dans le cadre des programmes d'action contre le manque d'énergie électrique dans les zones rurales et sahariennes. Cependant la mise en œuvre de ce système dans des environnements divers, avec des compétences techniques souvent limitées dans le domaine électrique, il est régulièrement constaté des défauts dans la conception des systèmes comme dans leur mise en œuvre. De plus, dans le calcul d'un tel système, il faut prendre soin du compte économique, du côté de la consommation d'eau, car ce dernier est soumis à des conditions et facteurs afin de l'installer avec une fiabilité et un excellent service. Ce chapitre est consacré à l'étude et au dimensionnement d'un système de pompage solaire photovoltaïque. Dans cette partie on présente les règles de dimensionnement basiques afin de pouvoir vérifier par soi-même l'exactitude de calcul relatif au dimensionnement des différentes parties d'un système de pompage photovoltaïque.

II.2. Méthode de dimensionnement

Dans le système de pompage photovoltaïque on peut distinguer deux parties, partie hydraulique et partie électrique. Ainsi le dimensionnement commence de la partie hydraulique en calculant les paramètres et caractéristiques nécessaires afin de passer à la 2^{ème} partie qui fournit la puissance l'énergie, répondant aux besoins hydraulique et à partir de cela, on fait le choix des composants correspondant aux conditions de ce système.

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

- Dimensionnement et le choix d'une pompe
- Dimensionnement du champ photovoltaïque

II.3. Dimensionnement et le choix d'une pompe

Le choix de la pompe utilisée est en relation avec les conditions du site qui s'articule autour des caractéristiques suivantes :

- Evaluation besoins journaliers en eau
- La hauteur manométrique totale
- Débit
- Energie nécessaire pour pomper [23]

II.3.1. Evaluation des besoins journaliers en eau

La détermination des besoins en eau pour la consommation d'une population donnée dépend essentiellement de son mode de vie. Les besoins en eau que l'on estime nécessaires pour les zones rurales sont de l'ordre de (20-30) litres par personne et (30-40) litres par tête de bétail [4]. Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, des facteurs météorologiques comme la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, la saison de l'année considérée et de la méthode d'irrigation. Cependant, il est important de se baser sur la pratique et l'expérience locale. La capacité du réservoir sera déterminée selon les besoins en eau journalières et l'autonomie requise du système.

II.3.2. La hauteur manométrique totale (HMT)

Cette hauteur exprime la différence entre pression en mètres de colonne d'eau des ouvertures d'aspiration et refoulement. Cette hauteur est donnée comme suit [15] :

$$HMT = (Hr + Nd) + Pc \quad (II.1)$$

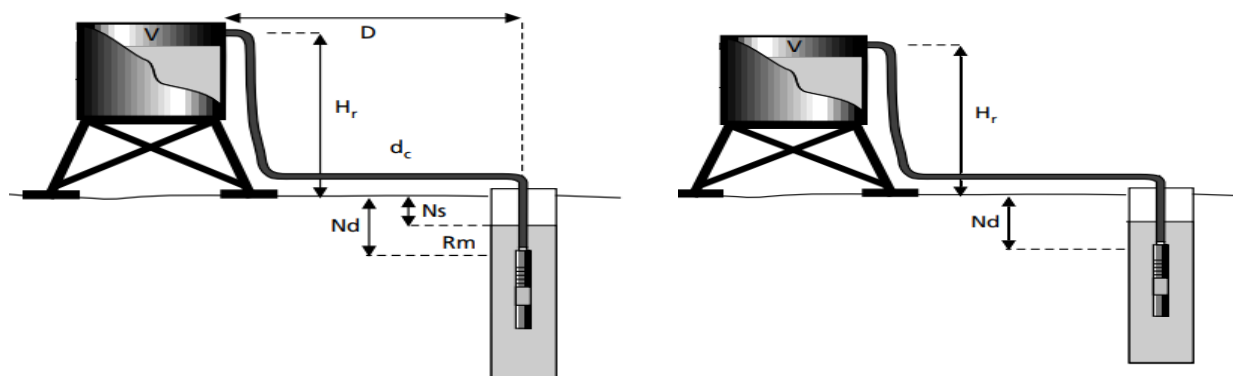


Figure II.1. Schéma et représentation des hauteurs du système

Hr : hauteur entre la surface de la terre au réservoir.

Nd : hauteur entre la nappe d'eau pompée à la surface de la terre (Ns+Rm).

Ns : Niveau statique, hauteur entre la surface d'eau et la surface de la terre.

Rm : hauteur entre la nappe d'eau pompée et la surface d'eau.

Pc : pertes de charge.

II.3.3. Pertes de charge

Il est bien connu que le déplacement d'un fluide visqueux, cause des frottements avec la paroi d'une conduite et les couches de fluide. Ces frottements donnent naissance à des pertes qui se manifestent en forme de chaleur. Ainsi, au cours de son déplacement l'énergie mécanique et sa « charge », diminue. Ce phénomène est appelé pertes de charge. Elle est exprimée comme une pression (en Pa) ou en mètres de colonne de fluide (mCF) [24] .

$$p_c = \rho \times g \times Lp_c \quad (\text{II.2})$$

p_c : Perte de charge en (pa)

g : la gravité de terrestre

ρ : Masse volumique de fluide en (kg/m³)

Lp_c : Perte de charge en (mCF)

On distingue deux types de pertes estimé séparément:

- Les pertes de charge linéaires : pertes dues aux frottements entre couches de fluide et entre fluide et paroi dans les sections de conduite :

$$Pl = \frac{\lambda \rho L V^2}{2D} (pa) \quad (\text{II.3})$$

- Les pertes de charge ponctuelles : liés à un frottement avec un élément ou accident sur la conduite (vanne, coude, rétrécissement...):

$$Pp = \frac{T \rho V^2}{2} (pa) \quad (\text{II.4})$$

La somme de ces deux pertes donne les pertes de charge totales.

II.3.4. Débit nécessaire

Le débit est la quantité d'eau fourni de la pompe en une durée de temps, il est exprimé en (m^3) par jour (m^3/J) ou en litres par heure (l/h).

En pompage solaire, le débit est lié au nombre d'heures d'ensoleillement de bon fonctionnement pendant la journée [25] .

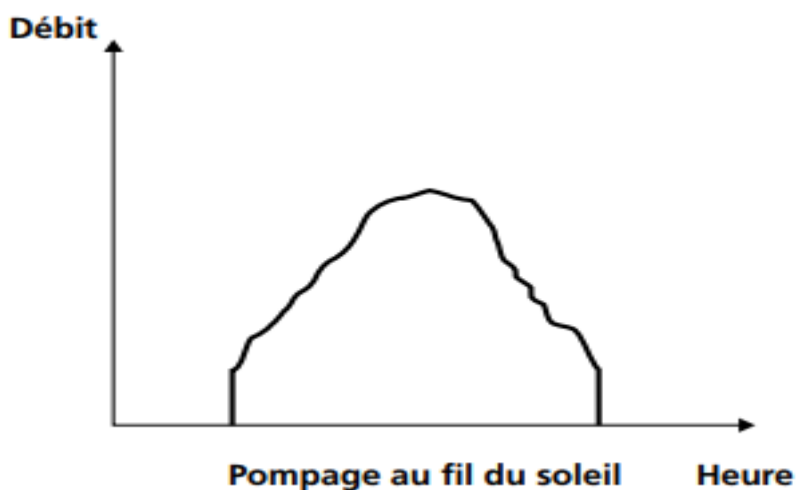


Figure II.2. Variation de débit en fonction d'heure d'ensoleillement [15]

Afin d'estimer le débit maximal de la pompe, la quantité d'eau journalier générale (D_j) est divisée par le nombre d'heures d'ensoleillement maximale (h_e) :

$$Q = \frac{D_j}{h_e} \quad (\text{II.5})$$

II.3.5. Choix de type de pompes

La courbe II.3 donne les différentes pompes utilisées dans le domaine de pompage hydraulique.

Le choix d'une pompe dépend généralement de la source d'alimentation (directe, groupe électrogène, source photovoltaïque.....etc.), et de hauteur manométrique HMT.

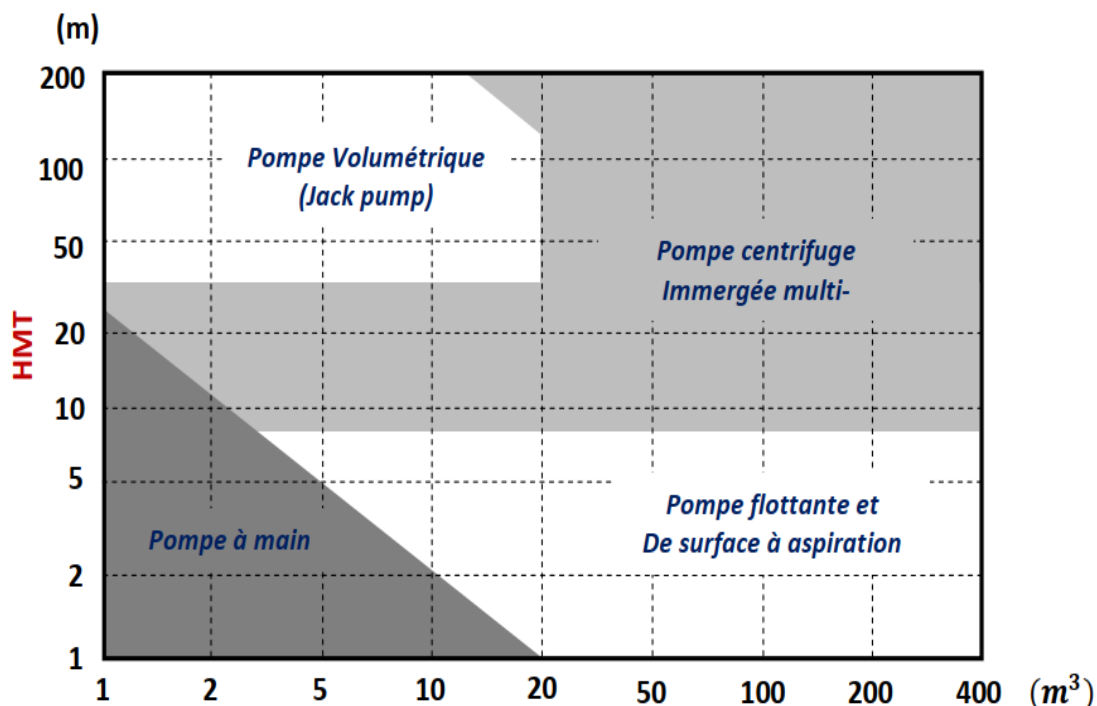


Figure II.3. Volume pompé par jour [15]

II.3.6. Diamètre des conduites

Le diamètre des conduites a une grande influence sur l'installation et le fonctionnement du système de pompage et cela, conditionné par le débit convenable et les pertes d'énergies. D'autre part, le choix du diamètre des conduites joue un rôle important pour le contrôle de la hauteur dynamique N_d , car l'augmentation du diamètre fait diminuer la hauteur dynamique et aussi les pertes de charges. Le tableau II.1 donne une estimation des diamètres des tuyaux pour chaque tache [17].

Tableau II.1. Débits admissible et logique en fonction des diamètres de tuyaux [26]

Débits admissible et logiques fonction du diamètre intérieur de tuyaux											
Diam.int.tuyaux(mm)	Ø15	Ø20	Ø25	Ø32	Ø40	Ø50	Ø65	Ø80	Ø100	Ø125	Ø150
A l'aspiration (m ³ /h)	1	1.7	2.5	4.3	7	11	18	27	42	70	95
Au refoulement (m ³ /h)	1.3	2.3	3.5	5.8	9	17	28	39	69	88	127
Débit mini refoulement pour auto curage (m ³ /h)				2	3.5	5.5	9	14	20	35	55

Analytiquement il est possible de calculer le diamètre par la formule de Bresse :

$$D = K_1 \sqrt{Q} \quad (\text{II.6})$$

K_1 : Coefficient variant

II.3.7. Calcul de l'énergie électrique requise

L'énergie électrique nécessaire pour transporter quantité d'eau a une hauteur pendant une journée est exprimée en wattheure [15] :

$$E_{elec} = \frac{C_H Q H M T}{\eta_p} \quad (\text{II.7})$$

C_H : Constante hydraulique égale à 2.725 kg.s.h/m²

η_p : Rendement du groupe motopompe

$$\eta_p = \eta_{\text{motor}} * \eta_{\text{pump}}$$

II.4. Dimensionnement du champ photovoltaïque

Le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome a besoin de la connaissance de certains paramètres afin d'obtenir une conception optimale tels que la source de données naturelles. Généralement, les valeurs moyennes journalières de l'irradiation solaire prise en compte doivent être choisit pour la période ou le mois le plus défavorable de côté production d'énergies. Les paramètres de la base de données present en compte pour faire le dimensionnement sont généralement, l'irradiation solaire, températures, vitesse de vent, pressionetc.

II.4.1. Calcul de la puissance crête

La puissance crête est l'une des caractéristiques d'un panneau dans les conditions STC (ensoleillement de 1000W/m², température 25°C). L'énergie fournie par les panneaux solaires en une journée doit être égale à l'énergie journalière consommée par la pompe. La puissance crête se calcule en fonction de trois facteurs [27]:

$$P_{cr} = \frac{E_{elec}}{F_c I_r} \quad (\text{II.8})$$

E_{elec} : l'énergie journalière consommée (Wh)

F_c : constant des pertes d'énergie (0.65- 0.75)

I_r : irradiation moyenne (kW/m²/j)

II.4.2. Le choix de tension du système

La tension du système a une relation directe avec la puissance crête, à l'aide du tableau ci-dessous, nous pouvons déterminer la tension à acquérir en fonction de nos besoins de la puissance crête :

Tableau II.2. Choix de tension de travail de système [27]

V_{SYSTEM}	12 v	24 v	48 v
Pcr (Wc)	Pcr < 500	500 < Pcr < 2000	Pcr ≥ 2000

II.4.3. Calcul de nombre de panneaux solaire

Le nombre de panneaux est donné par :

$$N_P = \frac{P_{CR}}{P_{panneau}} \quad (II.9)$$

Le nombre de panneaux en série est déterminé par :

$$N_{Psérie} = \frac{U_{syst}}{V_{mp}} \quad (II.10)$$

Le nombre de panneaux en parallèle est obtenu par :

$$N_{Ppar} = \frac{N_P}{N_{Psérie}} \quad (II.11)$$

II.5. Etude de cas et analyse

II.5.1. Présentation de la localité d'étude

La willaya de Souk Ahras situé à l'extrême est du pays, à côté de la frontière tunisienne est considérée comme l'une des régions frontalières les plus importantes, de point de vue de sa richesse des ressources naturelles et de son climat.

Le climat de Souk Ahras a des caractéristiques uniques à cause de l'influence des différents facteurs qui lui confèrent ces caractéristiques. La propagation des courants marins humides est aisée à une distance de 80 kilomètres de la mer Méditerranée. Son nord est entouré de montagnes recouvertes d'une richesse forestière louable et source d'eau profonde naturelle. Quant au sud, il est constitué de l'extension des hauts plateaux qui s'alignent sur les régions sub-sahariennes, l'exposant à un vent un peu chaud. De ce fait, le nord de la wilaya a connu un climat semi-humide, et le sud un climat semi-aride. Souk Ahras est connue par un été chaud et sec et un hiver froid et humide.

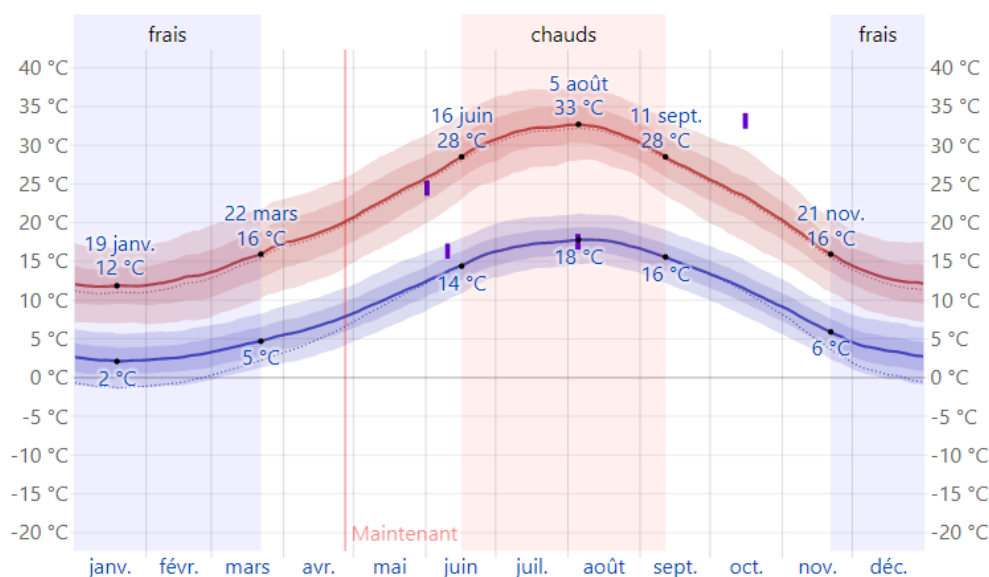


Figure II.4. Variation de la température au cours de l'année [28].

Suite à la figure II.4, La ligne rouge représente La température moyenne quotidienne maximale, cependant la ligne bleue représente la température minimale. Les fines lignes pointillées sont les températures perçues moyennes. Correspondantes

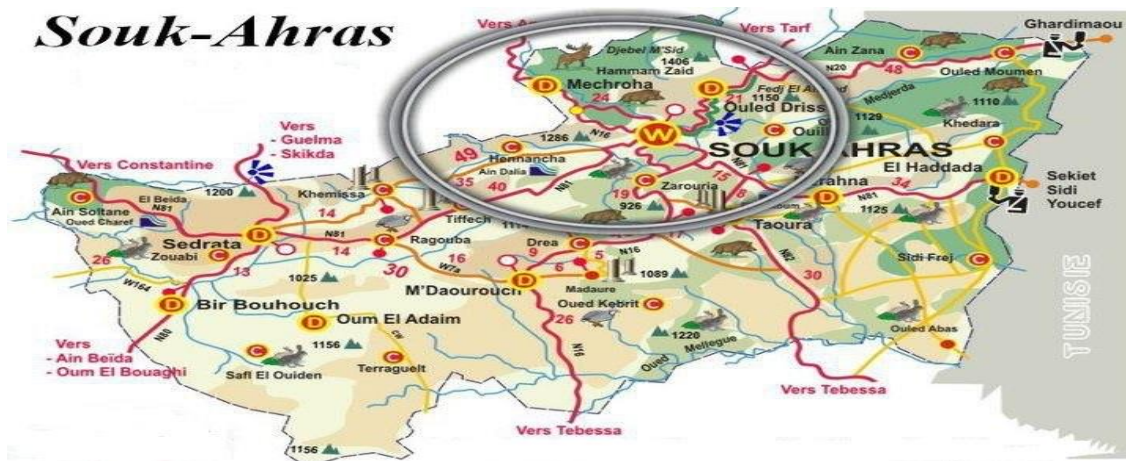


Figure II.5. Localisation de la wilaya de Souk Ahras

II.5.2. Estimation de l'ensoleillement

En générale la région de Souk Ahras est caractérisée par la disponibilité de l'ensoleillement mais, sa variation dépend selon les conditions atmosphériques du climat, le ciel peut être plus ou moins couvert de nuages au cours de la journée diminue parfois complètement ou partiellement la lumière du soleil, empêchant le rayonnement d'atteindre le sol avec sa concentration totale. Donc cela dépend du climat s'il est nuage ou moins de nuages.

Le tableau II.3 donne quelques paramètres météorologiques moyens calculés relevées par la station météo 'Souk Ahras' située à 3.2 km de Souk _Ahras. La figureII.6 donne moyenne mensuelles de l'ensoleillement de la région de souk ahras.

Tableau II.3. Moyennes calculées avec les données de la station météo 'Souk Ahras' située à 3.2 km de Souk Ahras [29].

Mois	Ensoleillement (h/j)	Moyenne Min (°C)	Moyenne Max (°C)	Record Min (°C)	Record Max (°C)	Précipitation (mm)	Jour de pluie
Janvier	5	4	12	-6	25	101	10
Février	6	4	12	-6	27	108	11
Mars	7	6	16	-1	31	85	9
Avril	8	8	19	1	32	71	8
Mai	9	12	24	4	37	58	7
Juin	10	16	30	7	43	25	3
Juillet	11	19	34	12	44	8	1
Aout	10	19	33	1	43	20	3
Septembre	8	16	28	8	40	42	6
Octobre	7	13	24	3	37	50	7
Novembre	6	8	17	-1	29	81	8
Décembre	4	5	13	-4	26	111	11



Figure II.6. Moyenne mensuelles d'insolation de souk ahras [30]

II.5.3. Dimensionnement et choix de la pompe

Avant de dimensionner la pompe, il est impératif de déterminer les caractéristiques de forage dont on veut utiliser pour pomper de l'eau [23]. Le tableau II.4 donne quelques caractéristiques de forage dont on exploite.

Tableau II.4. Caractéristique du forage

Profondeur totale H	Diamètre du forage R	Niveau statique Ns	Niveau dynamique Nd	Rabatement Rm
50m	1 m	30.5m	33.5 m	3 m

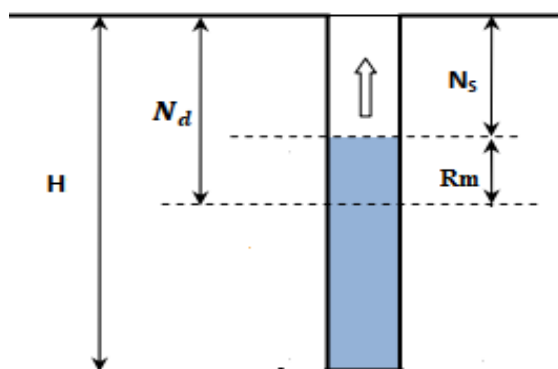


Figure II.7. Schéma du forage

II.5.4. Estimation de besoin d'eau

L'étude va se faire dans une ferme située à 14 km de la ville de Souk Ahras, de spécifier 2 ha (20000m²), habité par 5 personnes et comportant des animaux (vaches et bœuf, chèvres et moutons, lapins, poulet) et surface agriculture. Le tableau II.5 donne les normes pour le calcul des besoins en eau.

Tableau II.5. Les trois normes pour le calcul de besoin d'eau [15]

Humain	Animaux	Irrigation
5 L /jour survie	Bœuf 40L / jour	tomate 6 m ³ /jour/ha
10L/jour minimum admissible	Moutons, chèvre 5L/ jour	pomme de terre 20 m ³ /jour/ha
30L / jour condition de vie normale	Cheval 40L/ jour	l'ail 3 m ³ /jour/ha

II.5.5. Capacité de la citerne

Le stockage d'eau se fait dans un réservoir installer à une hauteur de 6 m du sol qui se caractérise par un diamètre 4.79 m, hauteur 1.5 m et une capacité de 27m³ et s'éloigne 10 m du forage.

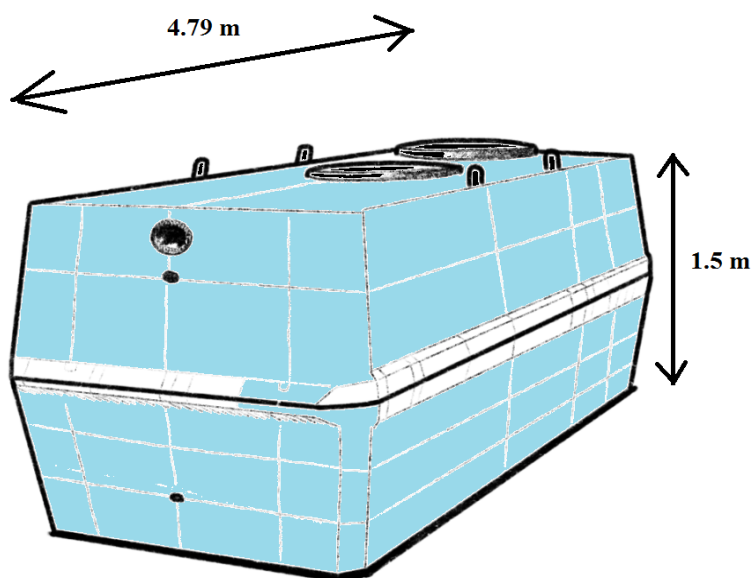


Figure II.8. La citerne d'eau.

II.5.6. Dimensionnement de la pompe

Afin de dimensionner notre pompe à utiliser, il faut déterminer les divers paramètres essentiels : tel que le niveau statique, le niveau dynamique et le rabattement.

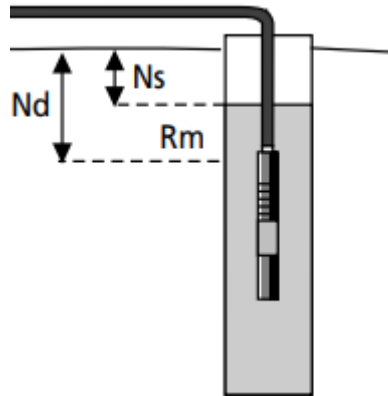


Figure II.9. Pompe immergée

III.5.7. Débit horaire nécessaire

$$Q_e = \frac{D_j}{H_e} = \frac{20m^3}{7.2h} = 2.77m^3 / h$$

H_e : Nombre d'heure d'ensoleillement.

D_j : La valeur de la demande journalière.

II.5.8. Calcul de la Hauteur manométrique totale HMT

➤ Diamètre de la conduite des tuyaux

A l'aide de la formule de Bresse : avec $K= 47.23$ et Q en (l/s) et D en (mm)

$$D = 47.23\sqrt{Q}$$

$$Q = 2.77 m^3/h = 0.77 l/s$$

$$\text{Donc : } D = 47.23\sqrt{0.77} = 42mm$$

Après calcul, le diamètre le plus adopté est 50mm, La vitesse d'écoulement dans les conduites est 0.4 m/s.

➤ Les pertes de charges

Le calcul des pertes de charges dépend de la diminution de la pression qui est due au frottement du fluide avec les différents éléments de la conduite, on va calculer d'abord les pertes linéaires P_l provoqué par frottement du fluide avec le mur de la conduite droite et après les pertes charge ponctuelles de leur tour provoqué par les coudes de la conduite.

Calcule les pertes linéaires

Au premier, il faut calculer le coefficient de perte de charge λ qui est lié à nombre de Reynolds Re :

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{1000 \times 0.4 \times 0.05}{10^{-3}} = 20000$$

ρ : Masse volumique du fluide (kg/m^3)

V : vitesse d'écoulement du fluide (m/s)

D : diamètre de la conduite

μ : viscosité dynamique en (kg/m.s) = 10^{-3} kg/m.s

$Re < 10^5$ donc le coefficient de perte de charge est calculé à partir de la formule empirique de Blasius :

$$\lambda = 0.316 \times Re^{-0.25} = 0.316 \times 20000^{-0.25} = 0.027$$

➤ La longueur de la conduite du tuyau

$$L = Hr + Nd + 10 = 51m$$

$$P_l = \frac{\lambda \rho L V^2}{2D} = \frac{0.027 \times 1000 \times 51 \times 0.4^2}{2 \times 0.05} = 2203.2 \text{ pa} = 0.18m$$

➤ Calcul des pertes de charge ponctuelle

Le tableau II.6 donne les éléments hydrauliques de la conduite et les coefficients de singularité correspondante :

Tableau II.6. *Éléments hydrauliques de la conduite et Coefficient de singularité*

Éléments	Nombre	Coefficient
Filtre	1	1
Coude 90°	3	0.75
Clapet de retenue	1	2
2Robinet	1	1

Coefficient de singularité total : $1+3 \times 0.75+2+1=6.25$

$$P_p = \frac{T \rho V^2}{2} = \frac{6.25 \times 1000 \times 0.4^2}{2} = 500 \text{ pa} = 0.05 \text{ m}$$

➤ **Les pertes totales**

$$L_{p_{totale}} = P_l + P_p = 0.18 + 0.05 = 0.23 \text{ m}$$

➤ **Hauteur manométrique totale HMT**

$$HMT = H_r + N_d + L_{p_{totale}}$$

$$HMT = 7.5 + 33.5 + 0.27 = 41.27 \text{ m}$$

II.5.9. Choix de la pompe

Notre site nécessite un débit Q qui doit se pomper à une hauteur manométrique total minimum HMT. A l'aide de la figure du choix d'une pompe selon la HMT et le débit demandés, la pompe centrifuge immergée multi-étages peut répondre à nos exigences et besoins. Le modèle de la pompe choisie est le modèle Grundfos. La pompe centrifuge multi-étages de type SP 3A-10.

Tableau II.7. Caractéristiques de la pompe choisie

Marque	Grundfos
Type de produit et model	Pompe centrifuge multi-étage SP 3A-10 120V
Type moteur	Moteur AC triphasé
Tension d'alimentation	120V
Courant max	12.5 A
Débit nominal	4.2 m³/h
Débit max	5.1 m³/h
HMT nominal	30 m
HMT max	70 m
Puissance	1500 W
Efficacité	33.8%

➤ **Calcul de l'énergie électrique nécessaire par jour**

$$E_{elec} = \frac{C_H QHMT}{\eta_p} = \frac{2.725 \times 20 \times 41.27}{0.338} = 6655 \text{wh} / j$$

II.5.10. Dimensionnement du champ photovoltaïque

On a fait le choix d'un panneau de type monocristallin 400W qui a les caractéristiques suivantes :

Les caractéristiques électriques et physiques des panneaux photovoltaïques choisie sont données par le tableau II.8 et II.9

Tableau II.8. Caractéristiques électriques

Fabriquant	Généric
I _{sc}	11.1 A
V _{oc}	47V
I _{mp}	10.41A
V _{mp}	38.4V
Nombre de cellule	72
Puissance	400W

Tableau II.9. Caractéristiques physiques

Longueur	2131mm
Largeur	1052mm
Epaisseur	35mm
Poids	29.50Kg
Surface du module	2242m ²

➤ **Calcul de la puissance crête**

L'irradiation moyenne d'après la source de données méteonorm du site d'installation est:

$$I_r = 4.6 \text{kw} / \text{m}^2 / j$$

$$P_C = \frac{E_{elec}}{F_c I_r} = \frac{6655}{0.6 \times 4.6} = 2411W$$

➤ **Tension du système**

La tension de système photovoltaïque selon la puissance crête calculer, on choisit à partir du Tableau II.2 la tension du système : $U_{sys} = 48V$

➤ **Calcul de nombre de panneaux et leur branchement**

$$N_p = \frac{P_C}{P_{panneau}} = \frac{2411}{400} = 6.02 \approx 6 \text{ panneaux}$$

➤ **Nombre de panneaux en série**

$$N_{Psérie} = \frac{U_{syst}}{V_{mp}} = \frac{48}{38.4} = 1.3 \approx 2$$

➤ **Nombre de panneaux en parallèle**

$$N_{Ppar} = \frac{N_p}{N_{Psérie}} = \frac{6}{2} = 3$$

➤ **Calcul de la surface d'installation du champ**

$$S = 2242 \times 6 = 13452mm^2 = 13.45m^2$$

➤ **Efficacité total du système**

$$\eta_{Totale} = \frac{P_{utile}}{P_{pv}} = \frac{1500}{2411} = 62\%$$

II.5.11. Analyse et simulation avec PVsyst

Le PVsyst est un logiciel pédagogique utile pour les ingénieurs et chercheur, il contient plusieurs modèles de travail et projet avec une explication détailler, afin de dimensionner et déterminer les paramètres pour but de réaliser les objectifs tracés auparavant par le demandeur. C'est un logiciel expérimental et précis.

Dans ce qui suit, on donne les fenêtres données par le logiciel après insertions des paramètres nécessaires de la région et du site choisi pour le dimensionnement.

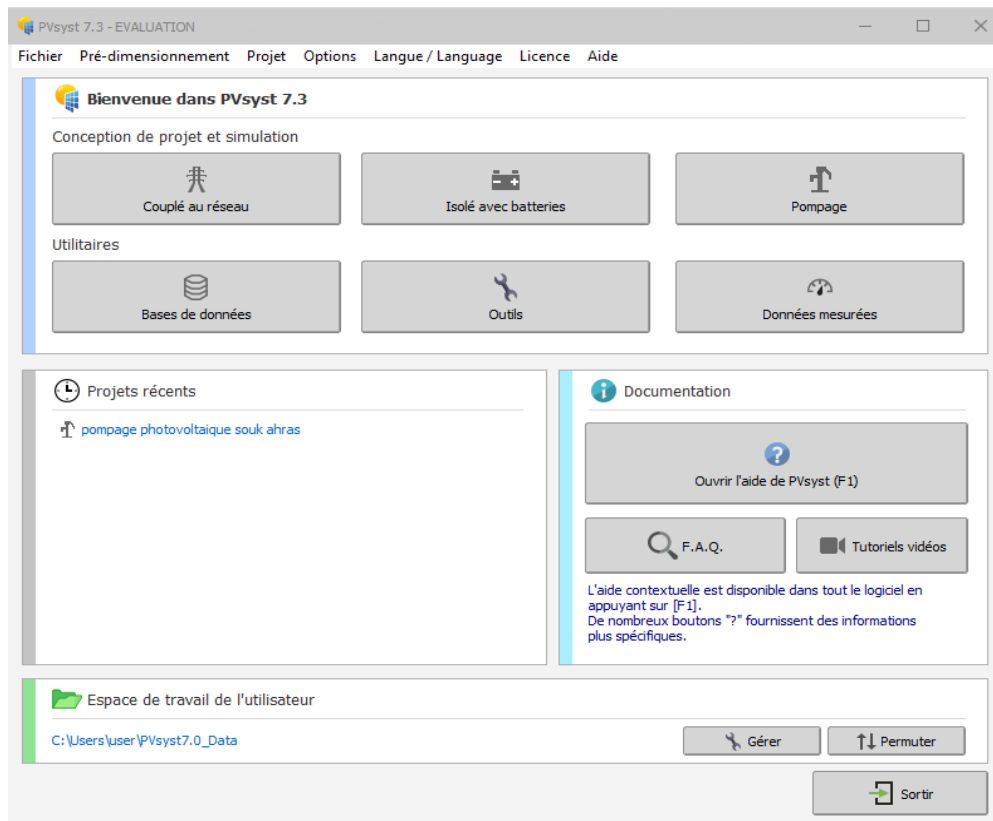


Figure II.10. Structure du logiciel PVsyst

➤ **Etape de réalisation du projet**

Afin de réaliser un projet, il faut passer aux étapes suivant :

- ✓ Etude et analyse des composants du site de notre projet
- ✓ Calculs détaillés des paramètres et besoins
- ✓ Choisir le choix 'pompage'
- ✓ importer la géographie et climat du site

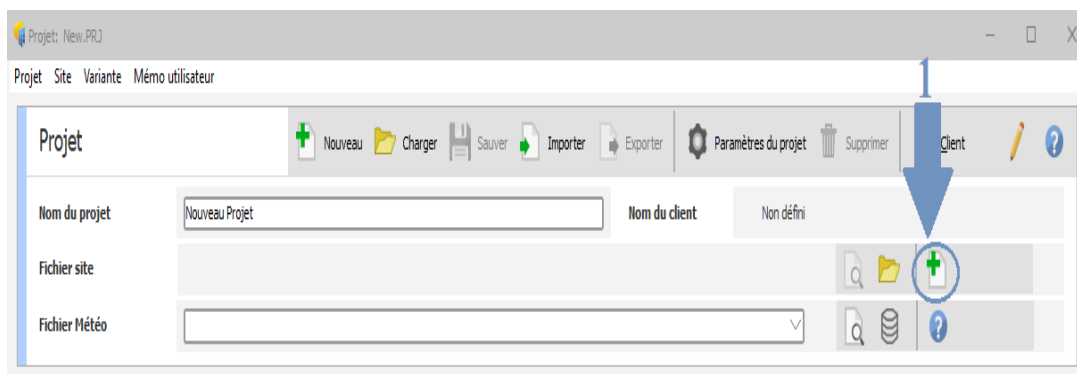


Figure II.11. Fenêtre d'identité du site

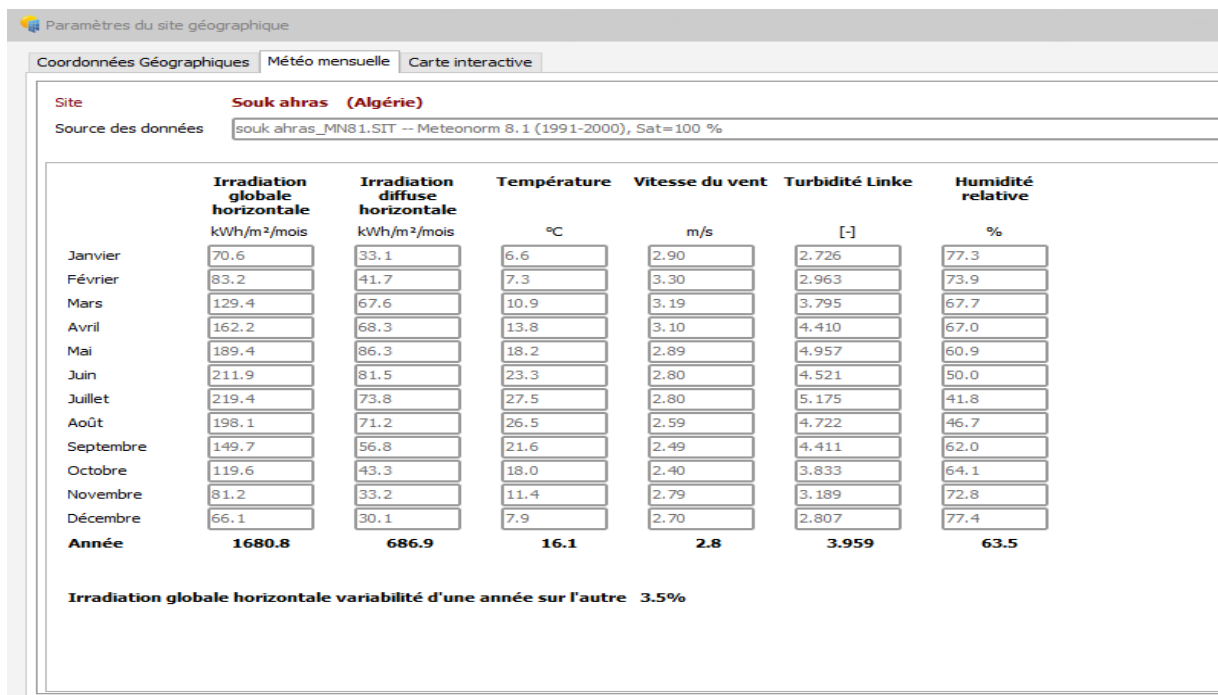


Figure II.12. Fenêtre du paramètre météorologique

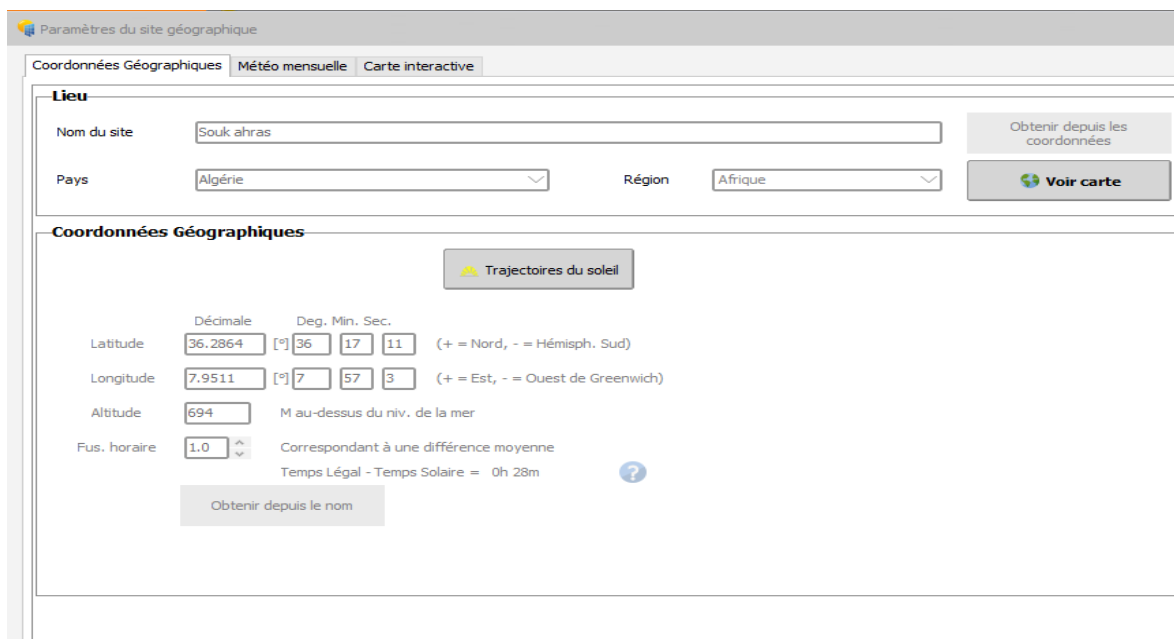


Figure II.13. Cordonné géographique du site

✓ orientation

Nos panneaux seront fixés et incliné de 30°, qui nous donnerons les pertes par rapport à l'optimum égal à 0.1%, et global sur plan égal à 1920 kW/m²/mois.

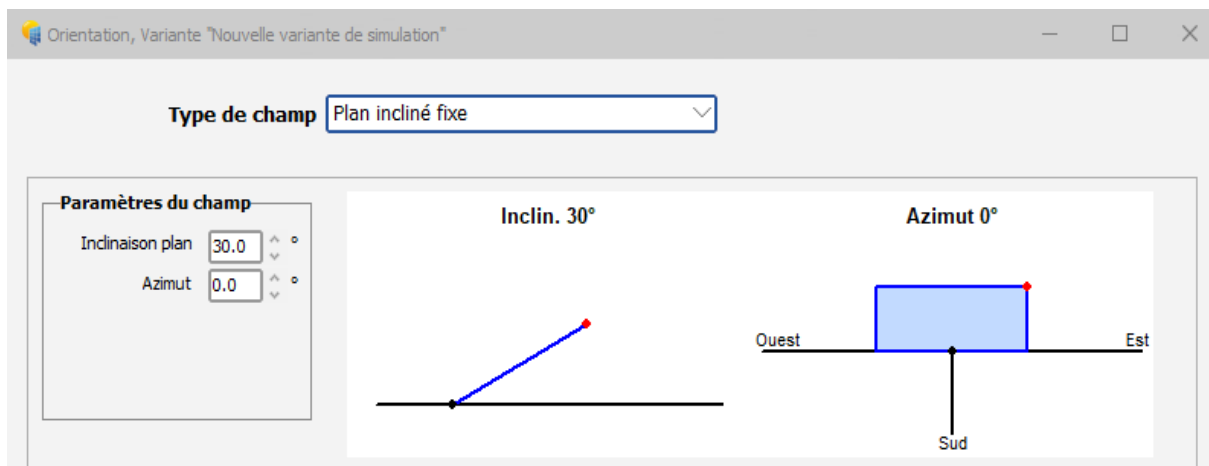


Figure II.14. Orientation des panneaux

Tableau II.10. Données requises à étudier

Réservoir	
Volume	27.0 m ³
Diamètre	4.79 m
Hauteur (plein)	1.50 m
Altitude d'injection	7.50 m
<input type="checkbox"/> Alimentation par le bas	

Tableau II.11. Les dimensions du réservoir et sa capacité

Caractéristiques du forage	
Niveau statique	-30.5 m
Rabatement	-0.03 m/m ³ /h
Débit maximum	100.0 m ³ /h
Niveau dynamique minimum	-33.5 m
Niveau pompe	-35.5 m
Diamètre du forage	100.0 cm

Tableau II.12. Caractéristique du forage à utiliser

Circuit hydraulique	
Choix tuyau	DN150 (6")
<input type="button" value="Tuyau personnalisé"/>	
Longueur de tuyaux	51 m
Nombre de coudes	3
Autres pertes de charge	0.00

➤ Choix de la pompe, modèle des panneaux et régulateur à utiliser

Choix d'un modèle de pompe

Grundfos

2.0 kW 30-70 m Wel, AC, Centrifuge multi-étages SP 3A-10 120V

Pompes en cascade ?

Pompes en parallèle

Caractéristiques de la pompe

Technologie pompe	Centrifuge multi-étages		
Moteur	Moteur AL triphasé		
Puissance maximale	1960 W	Tension	120 V
		Courant max.	12.5 A
Pression Min / Nom / Max	30	50	70 mCE
Débit corresp.	5.1	4.2	3.0 m ³ /h
Puissance corresp.	1500	1500	1500 W
Efficacité	27.7	38.2	38.5 %

Sélection du module PV

Disponibles

_Générique

400 Wp 32V Si-mono Mono 400 Wp 72 cells Depuis 2020

Modules nécessaires approx. 4

Dimens. des tensions : Vmpo (50°C) 33.0 V
Vco (-10°C) 52.0 V

Choisissez le mode de régulation et le régulateur

Régulateur universel

mode de régulation Onduleur tension fixe DC-AC

Tous les fabricants

1000 W Onduleur tension fixe DC-AC Universal Fixed V DC - AC Inverter Generic device Adaptab

Les paramètres de fonctionnement du régulateur universel seront automatiquement ajustés selon les propriétés du système.

Figure II.15. Définition de la pompe et module utilisé

Après avoir insérés les paramètres et les besoins de notre site, nous obtenons les résultats suivants :

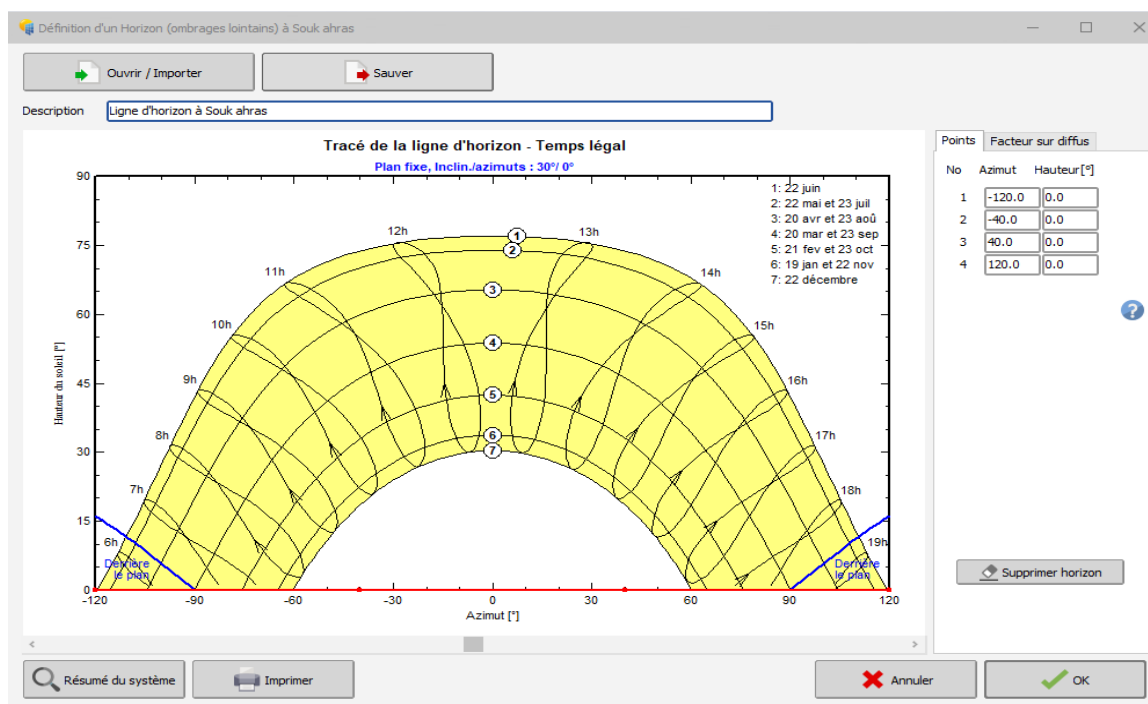


Figure II.16. Trajectoire du soleil

La position du soleil se localise par deux angles : l'angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu HA et son angle avec la direction du sud l'Azimut AZ.

II.5.12. Résultat de simulation numérique

La simulation effectuée par le logiciel Pvsystm est donnée par les figures II.17-II.23.

➤ Rapport final du projet de pompage photovoltaïque

C'est un compte rendu global d'informations du projet dans le logiciel. En commençant par le nom du site et sa localisation, les paramètres de besoins (besoins d'eau journalier, caractéristiques du forage et des éléments hydraulique), le choix de la pompe a utilisé, ainsi les détails sur les modules. Le rapport comprend les quantités de consommation et produite d'énergies (hydraulique, électrique) et consommation d'eau au fil de l'année.

Le rapport se termine avec un diagramme représentant les pertes du système de pompage photovoltaïque.

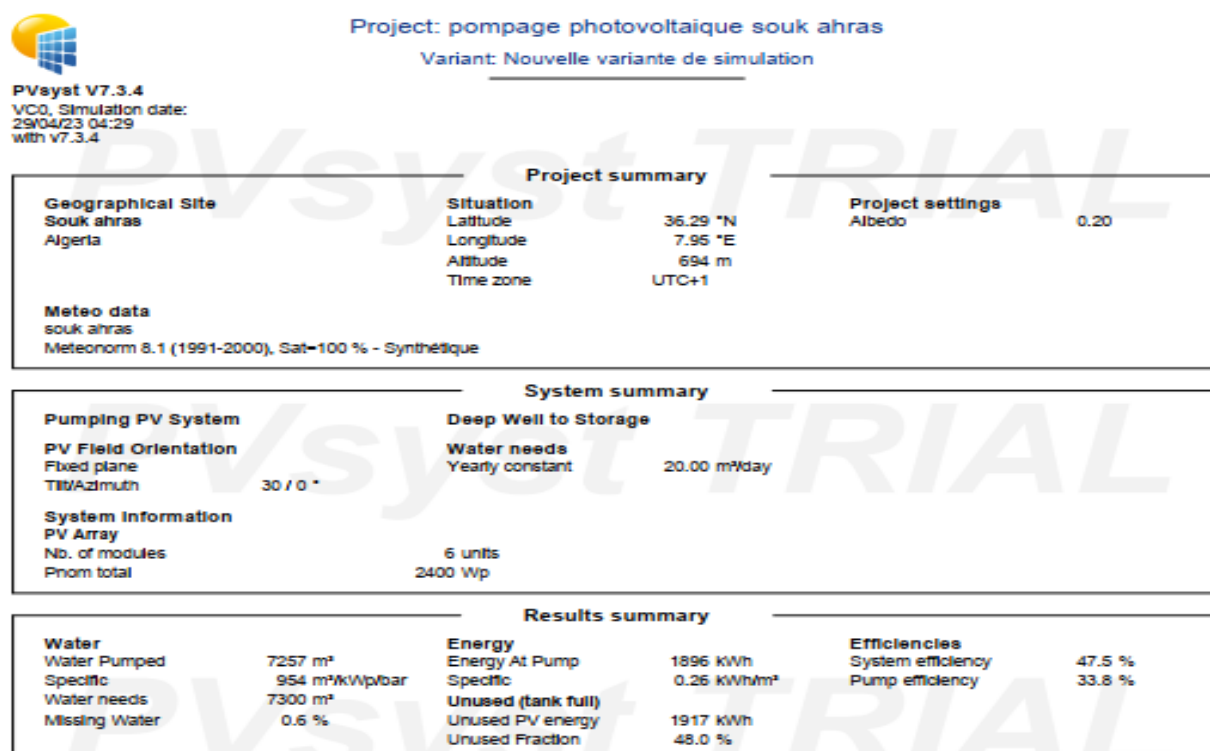


Figure II.17. Paramètres de simulation d'une installation PV (pompage d'eau)

Balances and main results

	GlobEff kWh/m ²	EArrMPP kWh	E_PmpOp kWh	ETkFull kWh	H_Pump meterV	WPumped m ³	W_Used m ³	W_Miss m ³
January	104.3	239.2	169.4	60.3	38.08	579.5	571.8	48.17
February	107.9	245.6	160.4	75.5	38.08	546.7	546.0	13.96
March	148.6	333.1	180.6	139.8	38.08	620.2	620.0	0.00
April	170.0	371.5	177.8	177.6	38.08	599.6	600.0	0.00
May	178.4	385.2	180.3	189.3	38.07	620.8	620.0	0.00
June	192.5	403.1	174.7	209.6	38.08	600.2	600.0	0.00
July	202.9	415.4	181.3	211.6	38.08	619.8	620.0	0.00
August	200.3	411.0	181.7	206.2	38.08	619.7	620.0	0.00
September	168.7	354.3	175.4	161.8	38.09	597.7	600.0	0.00
October	154.7	331.6	178.9	138.7	38.09	603.4	602.5	17.49
November	119.5	265.8	173.1	82.2	38.09	584.7	584.1	15.87
December	103.4	236.2	178.0	49.1	38.08	612.4	612.4	7.62
Year	1851.3	3992.1	2111.8	1701.5	38.08	7204.6	7196.9	103.11

Legends

- GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings
- EArrMPP Array virtual energy at MPP
- E_PmpOp Pump operating energy
- ETkFull Unused energy (tank full)
- H_Pump Average total Head at pump
- WPumped Water volume pumped
- W_Used Water drawn by the user
- W_Miss Missing water

Figure II.20. Paramètres de simulation d'une system PV pour pompage d'eau

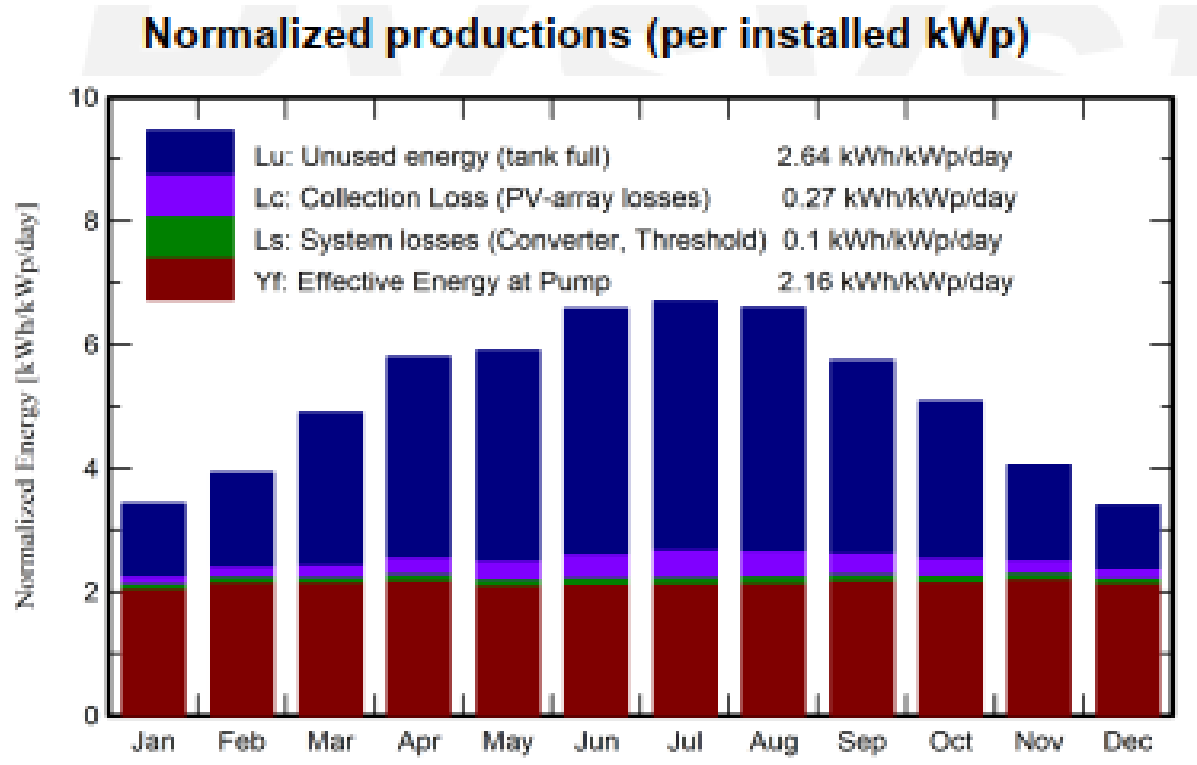


Figure II.21. Energie utile produite par le champ PV

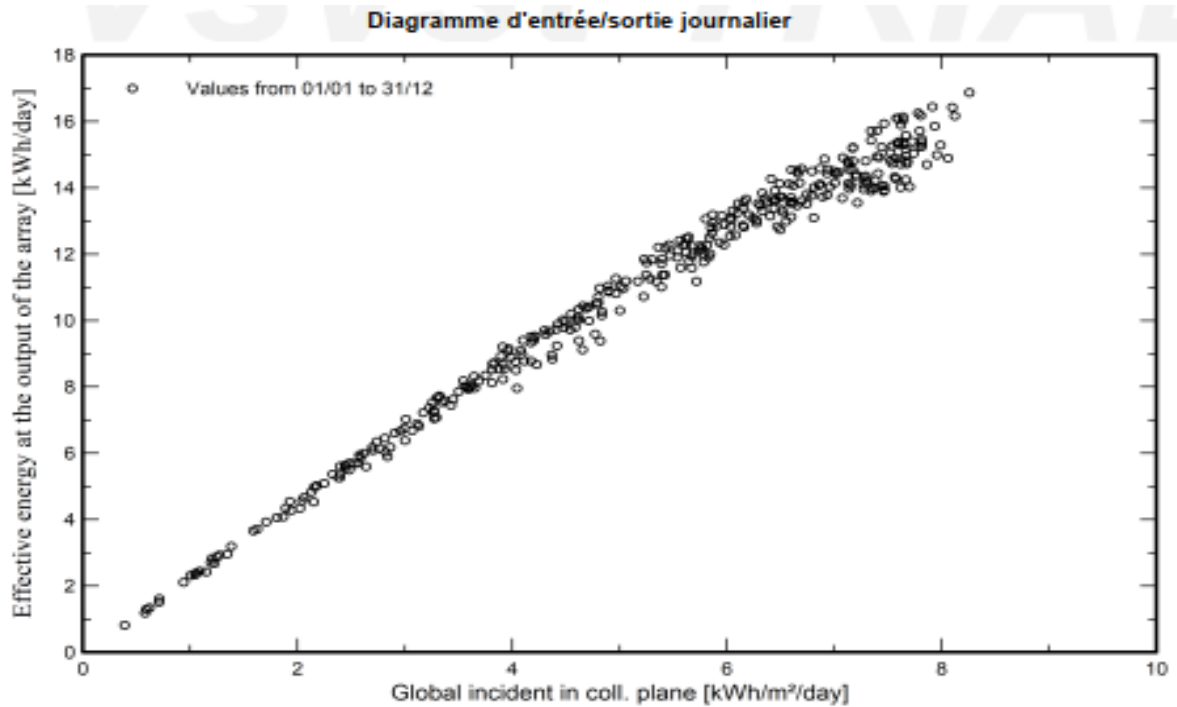


Figure II.22. Diagramme journalier d'Entrée/Sortie du système PV

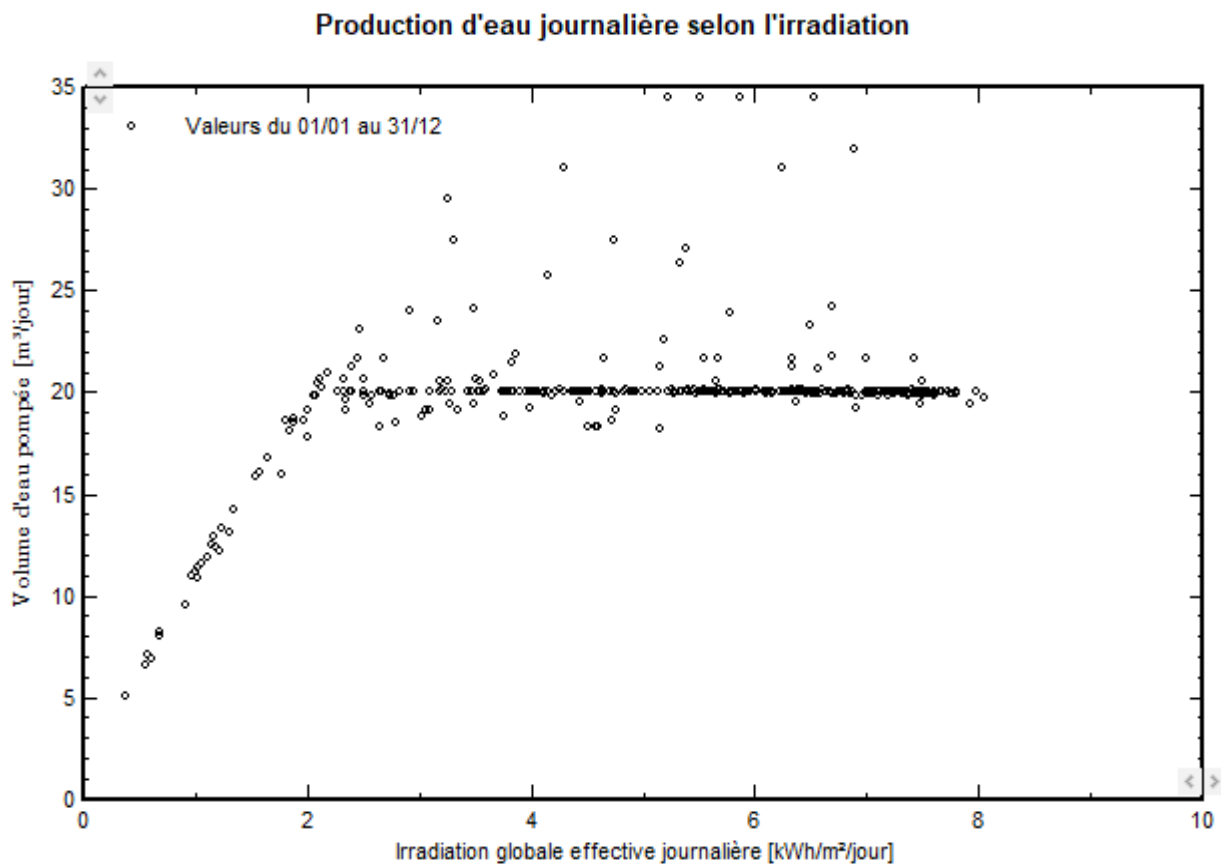


Figure II.23. L'eau pompée en fonction de l'irradiation

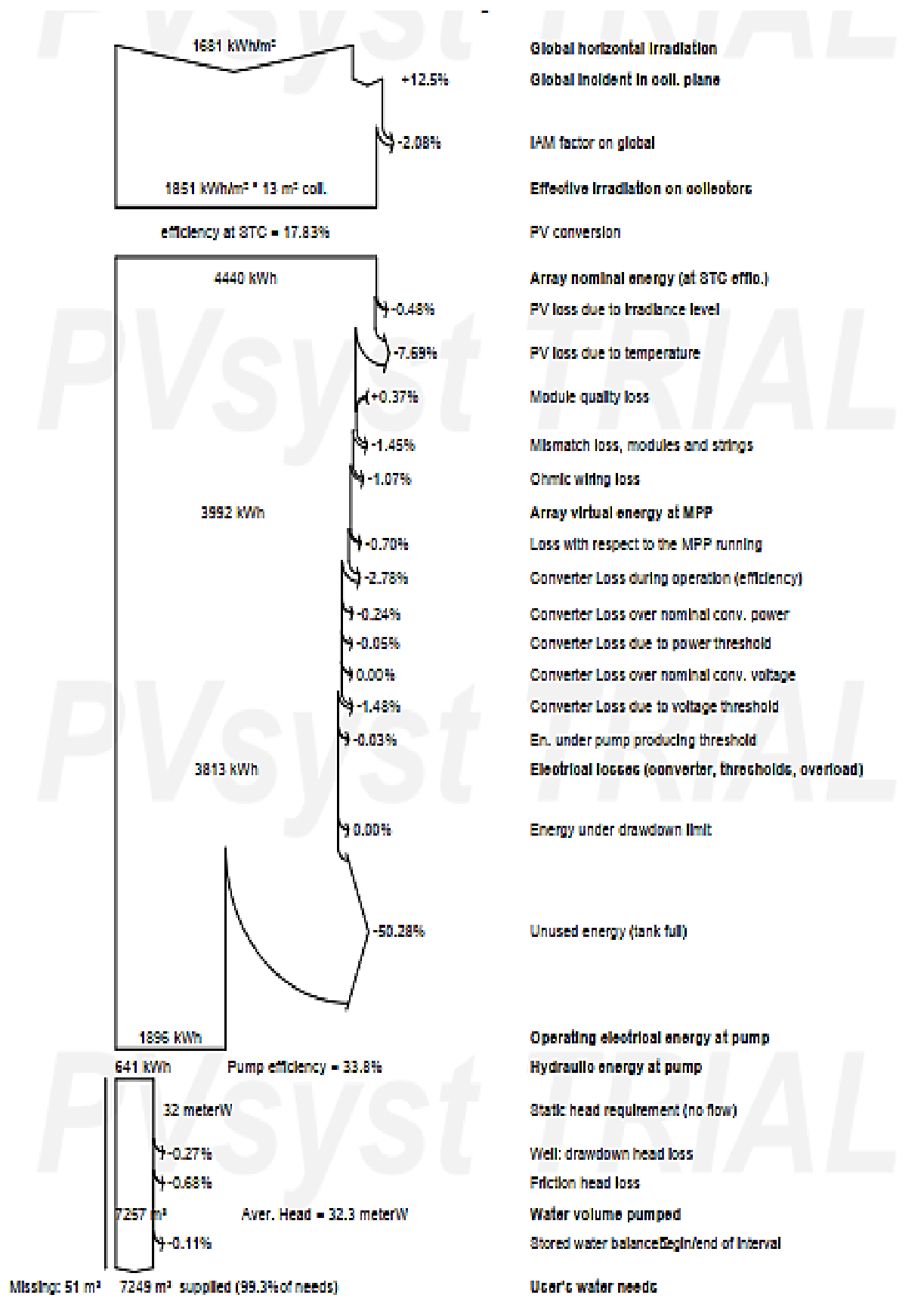


Figure II.24. Diagramme des pertes.

II.5.13. La comparaison entre résultat théorique et résultat du logiciel

Le tableau II.13 donne comparaison des paramètres calculés manuellement et les paramètres calculés par le logiciel PV system.

Tableau II.13. La comparaison.

Le résultat théorique	Le résultat par simulation (logiciel PVSYST)
Puissance de pompe Centrifuge Multi stage SP 3A-10 120V	Puissance de pompe Centrifuge Multi stage SP 3A-10 120V
HMT=41.27m	HMT=38m
Module mono cristallin, Puissance 400Wc, Unominal= 32V,	Module monocristallin, Puissance 400Wc, U nominal= 32V,
Puissance crête= 2411W	Puissance crête= 2400W
Nombre de module total =6	Nombre de module total =6
Module série=2	Module série=2
Module parallèle=3	Module parallèle=3
Efficacité de system globale = 62%	Efficacité de system globale = 52.9%

Nous remarquons que les résultats calculés théoriquement et celle du logiciel PV system sont très proches. La légère différence entre eux est due à la tolérance d'erreur de mesure que le PV system adopte dans la simulation.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord donné la méthode théorique pour le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque. Nous avons estimé d'abord la demande journalière en eau correspondant au débit total nécessaire pour répondre à l'irrigation ou à d'autres usages. Nous avons ensuite déterminé le potentiel solaire dans la région de Souk

ahras, sachant que les périodes de dimensionnement du système de pompage étaient les mois les plus ensoleillés. Par la suite nous avons dimensionné et sélectionné les types de pompes à utiliser. Et enfin nous avons calculés les paramètres du champ photovoltaïque nécessaire pour l'alimentation de notre système de pompage photovoltaïque.

Dans le chapitre qui suit, nous allons faire la modélisation et la simulation de notre système par le logiciel Matlab/Simulink et ceci, en insérons tous les paramètres trouver dans ce chapitre.

Chapitre III

Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque

Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque

III.1. Introduction

Généralement la modélisation d'un système consiste à définir les équations mathématiques qui expriment son fonctionnement et ces caractéristiques.

Dans ce travail, on s'intéresse aux systèmes photovoltaïques, pour cela dans ce chapitre on va faire la partie modélisation de ce type de système dans l'objectif d'exprimer mathématiquement son comportement afin de prédire leur performance et de les optimiser. Nous intégrons dans cette partie la modélisation de chaque composant de notre système photovoltaïque (champs PV, onduleur, moteur) et par la suite nous faisons une simulation avec logiciel Matlab/Simulink basé sur les paramètres calculés dans le chapitre précédent

III.2. Modélisation du générateur photovoltaïque

Pour modéliser un système photovoltaïque, il faut déterminer les caractéristiques électriques principales (courant-tension) de la cellule et cela en utilisant le schéma équivalent de cette dernière.

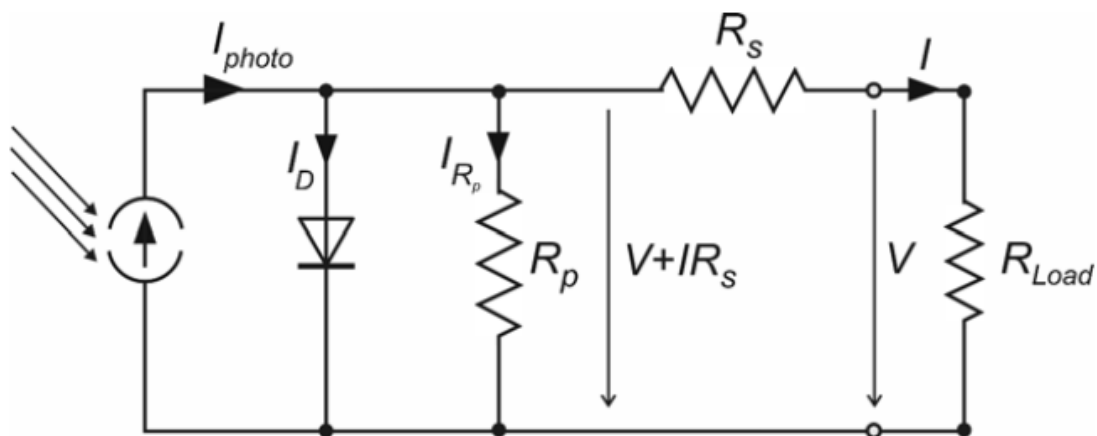


Figure III.1. Schéma de réseau électrique équivalent d'une cellule solaire [12][6].

Le courant extrait de la cellule solaire pourrait être décrit comme suit :

$$I = I_{PH} - I_D - I_{RP} \quad (\text{III.1})$$

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{q(V + I_{RS})}{KT}} - 1 \right) \quad (\text{III.2})$$

$$I_{RP} = \frac{V + I_{RS}}{R_P} \quad (\text{III.3})$$

On obtient :

$$I = I_{PH} - I_0 \left(e^{\frac{q(V + I_{RS})}{KT}} - 1 \right) - \frac{V + I_{RS}}{R_P} \quad (\text{III.4})$$

La tension du circuit ouvert s'écrit :

$$V_{OC} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{PH}}{I_D} \right) \quad (\text{III.5})$$

III.3. Modélisation de l'onduleur

L'onduleur triphasé est donné par le schéma simplifié suivant [16] :

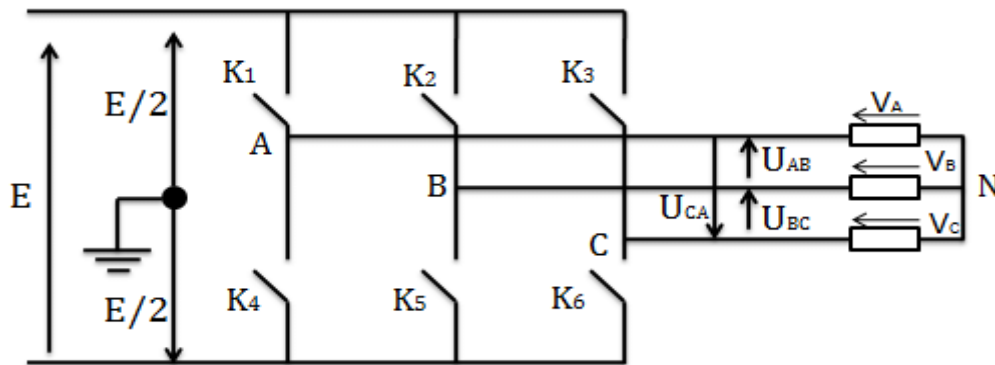


Figure III.2. Onduleur triphasé

$V_a(t)$, $V_b(t)$, $V_c(t)$: tensions simples

$V_{ab}(t)$, $V_{bc}(t)$, $V_{ca}(t)$: tensions composées

L'onduleur impose des tensions à partir des interrupteurs et cela aux bornes des sorties en les commandant par fermeture et ouverture :

- $V_a(t)$ égale $U/2$ quand $K1$ est fermé ($K4$ ouvert), $-U/2$ quand $K4$ fermé ($K1$ ouvert)
 - $V_b(t)$ égale $U/2$ quand $K2$ est fermé ($K5$ ouvert), $-U/2$ quand $K5$ fermé ($K2$ ouvert)
 - $V_c(t)$ égale $U/2$ quand $K3$ est fermé ($K6$ ouvert), $-U/2$ quand $K6$ fermé ($K3$ ouvert)
- [29]

On associe à chaque bras de l'onduleur une fonction logique de connexion K_i qui prend valeur 1 ou -1 :

$$\begin{cases} \text{si } K_a = 1, V_a(t) = U \\ \text{si } K_a = -1, V_a(t) = -U \end{cases} \Rightarrow V_a(t) = K_a.U \quad (\text{III.6})$$

$$\begin{cases} \text{si } K_b = 1, V_b(t) = U \\ \text{si } K_b = -1, V_b(t) = -U \end{cases} \Rightarrow V_b(t) = K_b.U \quad (\text{III.7})$$

$$\begin{cases} \text{si } K_c = 1, V_c(t) = U \\ \text{si } K_c = -1, V_c(t) = -U \end{cases} \Rightarrow V_c(t) = K_c.U \quad (\text{III.8})$$

Si le récepteur est équilibré, les tensions composées à la sortie de l'onduleur sont données par [16] :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_a - V_b \\ V_{bc} = V_b - V_c \\ V_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Ce qui donne la forme matricielle

$$\begin{pmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad (\text{III.10})$$

On remplace par les expressions des tensions simples en utilisant les fonctions logiques K_i :

$$\begin{pmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_a \\ K_b \\ K_c \end{pmatrix} \quad (\text{III.11})$$

Puisque le récepteur est équilibré, les tensions V_a , V_b et V_c ont une somme nulle ($V_a + V_b + V_c = 0$)

On peut donc écrire de ces relations :

$$\begin{cases} Va = \frac{1}{3}(Vab - Vca) \\ Vb = \frac{1}{3}(Vbc - Vab) \\ Vc = \frac{1}{3}(Vca - Vbc) \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

On peut l'écrire sous forme matrice

$$\begin{pmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Vab \\ Vbc \\ Vca \end{pmatrix} \quad (\text{III.13})$$

En remplaçant on aura le système matriciel comme suit :

$$\begin{pmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{pmatrix} = \frac{U}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Ka \\ Kb \\ Kc \end{pmatrix} \quad (\text{III.14})$$

III.4. Modélisation de la machine asynchrone

La machine asynchrone est l'une des machines à courant alternatif disponible dans le marché. C'est la plus utilisée dans les divers domaines industriels à cause de sa simplicité et de sa robustesse qui donne un bon fonctionnement avec moins de maintenance. De plus cette machine fonctionne à des différentes puissances (faible puissance, moyenne puissance et grande puissance).

Afin de modéliser la MAS il faut établir des hypothèses simplificatrices afin de but simplifier l'étude [31]:

- L'entrefer constant
- Pas régime permanent
- Néglignons les pertes magnétiques
- Régime homopolaire nulle
- Pas d'influence de la température sur les résistances de l'enroulement (ne varie pas)

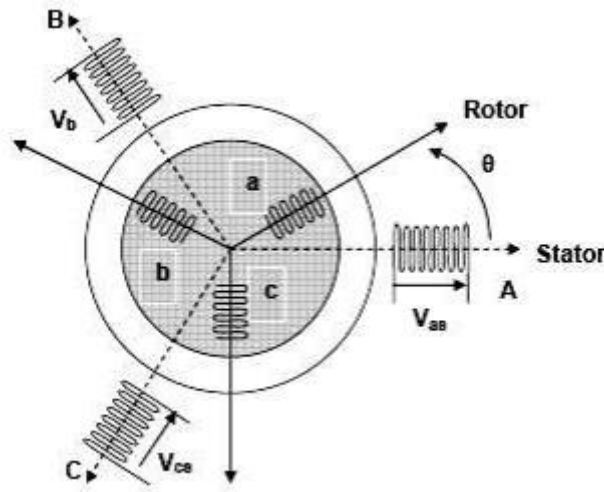


Figure III.3. Représentation schématique de la machine [31]

III.4.1. Equations électriques

Les équations des tensions statoriques et rotoriques peuvent être exprimées sous forme matricielle [31]:

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

$$[I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

$$[\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix}; [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

$$[R_s] = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix}; [R_r] = \begin{pmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{pmatrix} \quad (\text{III.18})$$

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\phi_s]}{dt} \Rightarrow \text{Phase statorique} \\ [0] = [R_r][I_r] + \frac{d[\phi_r]}{dt} \Rightarrow \text{phase rotorique} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

III.4.2. Equations magnétiques

Les flux dans les phases du stator et du rotor s'expriment aussi sous la forme matricielle comme suit [30]:

$$[L_s] = \begin{pmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{pmatrix} \quad (\text{III.20})$$

$$[L_{rr}] = \begin{pmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{pmatrix} \quad (\text{III.21})$$

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & \cos(\varphi - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\varphi - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\varphi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\varphi) & \cos(\varphi - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\varphi - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\varphi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\varphi) \end{pmatrix} \quad (\text{III.22})$$

$$\begin{cases} [\phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \Rightarrow \text{Phase statorique} \\ [\phi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{sr}][I_s] \Rightarrow \text{phase rotorique} \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

En mettant l'équation magnétique dans l'équation électrique on obtient

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + [L_{ss}] \frac{d[I_s]}{dt} + \frac{d([M_{sr}][I_r])}{dt} \\ [0] = [R_r][I_r] + [L_{rr}] \frac{d[I_r]}{dt} + \frac{d([M_{sr}][I_s])}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

III.4.3. Modèle de Park de la Machine Asynchrone

Pour simplifier et rendre les coefficients constants dans l'équation précédente, on fait une transformation appelé transformation de Park dans l'objectif de transformer les trois enroulements de la MAS en deux enroulements [31].

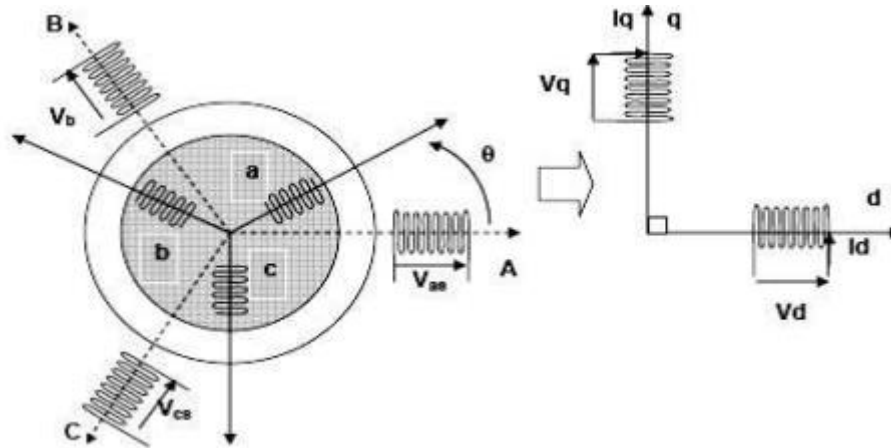


Figure III.4. Représentation schématique de modèle de Park à l'axe dq [31]

III.4.4. Transformation de Park des équations électrique

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_o \end{bmatrix} = [P(\theta_s)] \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{III.25})$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = [P(\theta_s)]^{-1} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_o \end{bmatrix} \quad (\text{III.26})$$

$$[P(\theta_s)] = c \begin{pmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{III.27})$$

C : une constante qui peut prendre soit les valeurs $2/3$ ou $\sqrt{2/3}$ pour assurer une conservation de la puissance [31].

En appliquant la transformation de Park sur les équations précédentes nous obtenons alors les nouveaux paramètres :

$$[P(\theta_s)]^{-1} [V_{sdq}] = [R_s] [P(\theta_s)]^{-1} [I_{sdq}] + \frac{d([P(\theta_s)]^{-1} [\phi_{sdq}])}{dt} \quad (\text{III.28})$$

En multipliant par $[P(\theta_s)]$:

$$[Vsdq] = [Rs][Isdq] + [P(\theta_s)] \frac{d([P(\theta_s)]^{-1}[\phi sdq])}{dt} \quad (\text{III.29})$$

$$[Vsdq] = [Rs][Isdq] + \frac{d[\phi sdq]}{dt} + [P(\theta_s)] \frac{d([P(\theta_s)]^{-1}[\phi sdq])}{dt} \quad (\text{III.30})$$

Or en calculant cette expression suivante on trouve :

$$[P(\theta_s)] \frac{d([P(\theta_s)]^{-1})}{dt} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{III.31})$$

L'expression devient alors :

$$[Vsdq] = [Rs][Isdq] + \frac{d[\phi sdq]}{dt} + \begin{pmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \end{pmatrix} [\phi sdq] \quad (\text{III.32})$$

Pour rotor la même méthode similaire et même étapes nous obtiendrons l'expression suivante [31] :

$$[0] = [Rr][Irdq] + \frac{d[\phi rdq]}{dt} + \begin{pmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \end{pmatrix} [\phi rdq] \quad (\text{III.33})$$

III.4.5. Transformation de Park des équations magnétique

$$\begin{bmatrix} \phi ds \\ \phi qs \\ \phi o \end{bmatrix} = [P(\theta_s)] \begin{bmatrix} \phi as \\ \phi bs \\ \phi cs \end{bmatrix} \quad (\text{III.34})$$

$$\begin{bmatrix} \phi as \\ \phi bs \\ \phi cs \end{bmatrix} = [P(\theta_s)]^{-1} \begin{bmatrix} \phi ds \\ \phi qs \\ \phi o \end{bmatrix} \quad (\text{III.35})$$

$$[P(\theta_s)]^{-1}[\phi dqs] = [L_{ss}][P(\theta_s)]^{-1}[Idqs] + [M_{sr}][P(\theta_s)]^{-1}[Idqr] \quad (\text{III.36})$$

Soit en multipliant par $[P(\theta_s)]$:

$$[\phi dqs] = [P(\theta_s)][L_{ss}][P(\theta_s)]^{-1}[Idqs] + [P(\theta_s)][M_{sr}][P(\theta_s)]^{-1}[Idqr] \quad (\text{III.37})$$

Un calcul simple à faire [30] :

$$[P(\theta_s)][L_{ss}][P(\theta_s)]^{-1} = \begin{pmatrix} L_s - M & 0 & 0 \\ 0 & L_s - M & 0 \\ 0 & 0 & L_s - M \end{pmatrix} = [L_{ss}] \quad (\text{III.38})$$

$$[P(\theta_s)][M_{sr}][P(\theta_s)]^{-1} = \frac{3}{2} M_{sr} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \frac{3}{2} M_{sr} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = [L_m] \quad (\text{III.39})$$

L'expression devient :

$$[\phi dqs] = [L_{ss}][Idqs] + [L_m][Idqs] \quad (\text{III.40})$$

Avec la même méthode, on applique la transformation sur la partie rotorique on obtient :

$$[\phi dqr] = [L_{rr}][Idqr] + [L_m][Idqs] \quad (\text{III.41})$$

En obtient alors le système ci-dessous :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{ds} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.42})$$

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s . I_{ds} + L_m . I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s . I_{qs} + L_m . I_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r . I_{dr} + L_m . I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r . I_{qr} + L_m . I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.43})$$

On peut simplifier ces équations en choisissant le référentiel qui sont trois [31] :

- Référentiel lié au stator : ou $\theta_s = 0$ et $\theta_r = -\theta$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s . I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s . I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} \\ 0 = R_r . I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{qr} \\ 0 = R_r . I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.44})$$

- Référentiel lié au rotor : ou $\theta_r = 0$ ET $\theta_s = \theta$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s . I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} . \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s . I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} . \phi_{ds} \\ 0 = R_r . I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} \\ 0 = R_r . I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.45})$$

- Référentiel lié au synchronisme : ou $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$ et $\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s . I_{ds} + \frac{d \phi_{ds}}{dt} - \omega_s . \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s . I_{qs} + \frac{d \phi_{qs}}{dt} - \omega_s . \phi_{ds} \\ 0 = R_r . I_{dr} + \frac{d \phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ 0 = R_r . I_{qr} + \frac{d \phi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{array} \right. \quad \text{(III.46)}$$

III.5. Modélisation de la pompe

Le rôle de la pompe est de fournir une puissance hydraulique qui permet de déplacer l'eau à une hauteur HMT requise pour un système et un débit correspond à cette puissance. Le débit de la pompe est exprimé par l'équation suivante :

$$Q = \frac{3600 . P_{hyd}}{\rho . HMT . 9,81} \quad \text{(III.47)}$$

La pompe est entraînée par un moteur asynchrone ce qui implique que la puissance hydraulique est liée à la puissance mécanique et par voie de conséquence à la vitesse et le couple du moteur. Cette relation est exprimée par l'équation suivante [20]:

$$\eta = \frac{P_{hyd}}{P_{méc}} \quad \text{(III.48)}$$

$$P_{méc} = T_{em} . \Omega \quad \text{(III.49)}$$

En remplaçant l'équation III.51 dans l'équation III.50 on obtient :

$$P_{hyd} = \eta . T_{em} . \Omega \quad \text{(III.50)}$$

En remplaçant cette dernière dans l'équation III.49 :

$$Q = \frac{3600 . \eta . T_{em} . \Omega}{\rho . HMT . 9,81} \quad \text{(III.51)}$$

Cependant il est nécessaire de connaître les paramètres de la pompe, qui nous permettent de connaître son point de fonctionnement.

III.6. Simulation du système pompage photovoltaïque

Le système adopté dans ce travail est composé d'un panneau photovoltaïque, d'un onduleur d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge. Les paramètres d'entrée de notre système sont l'irradiation variable et la température. La sortie de notre système est le débit d'eau pompé (Q).

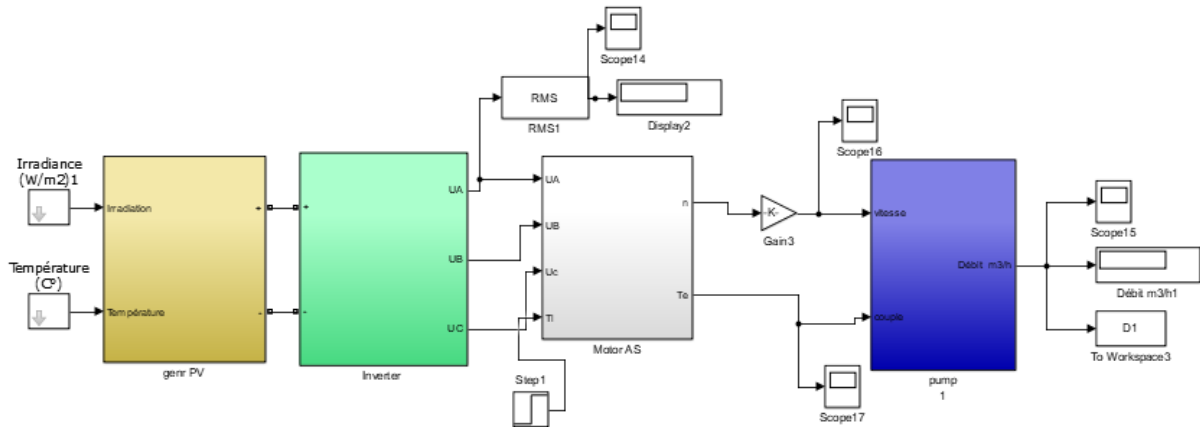


Figure III.5. Schéma global de simulation du système de pompage photovoltaïque

III.6.1. Simulation de générateur photovoltaïque

Notre champ photovoltaïque est constitué de 6 modules (2 série- parallèle), chaque module contient 72 cellules en série avec les mêmes caractéristiques, il délivre une tension continue suite à un appel de courant de l'onduleur de tension.

Après simulation, nous obtenons les résultats sous une température $T=25\text{C}^\circ$ et une irradiation $1000\text{ (W/m}^2\text{)}$:

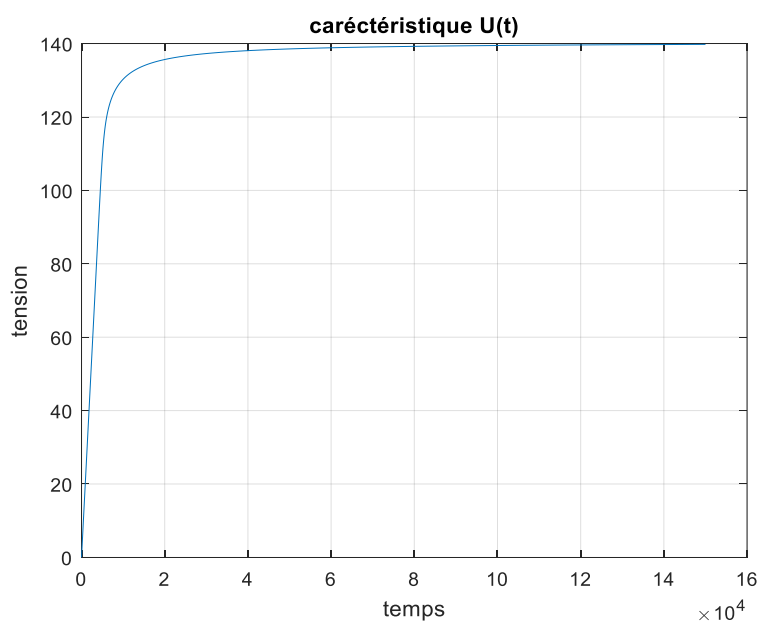


Figure III.6. Caractéristique tension en fonction du temps $U=f(t)$.

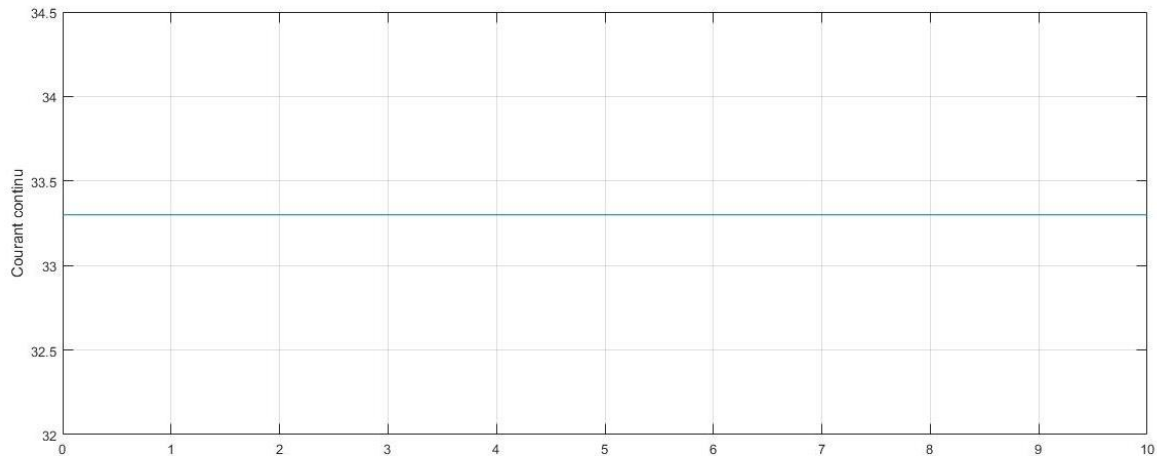


Figure III.7. Caractéristique courant en fonction du temps $I=f(t)$.

La figure III.6, représente la tension délivrée par le générateur photovoltaïque en fonction de temps. Cependant les figures III.8 et III.9 représentent les caractéristiques courant-tension et puissance tension de générateur photovoltaïque dans les conditions parfaite ($1000\text{W}/\text{m}^2$, 25C°).

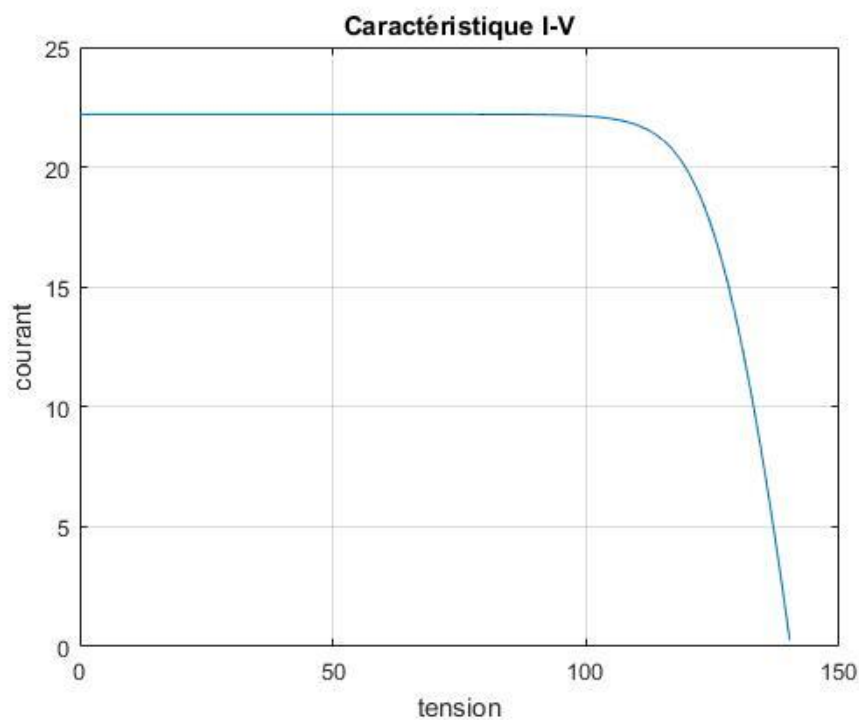


Figure III.8. Caractéristique courant en fonction de la tension $I=f(U)$.

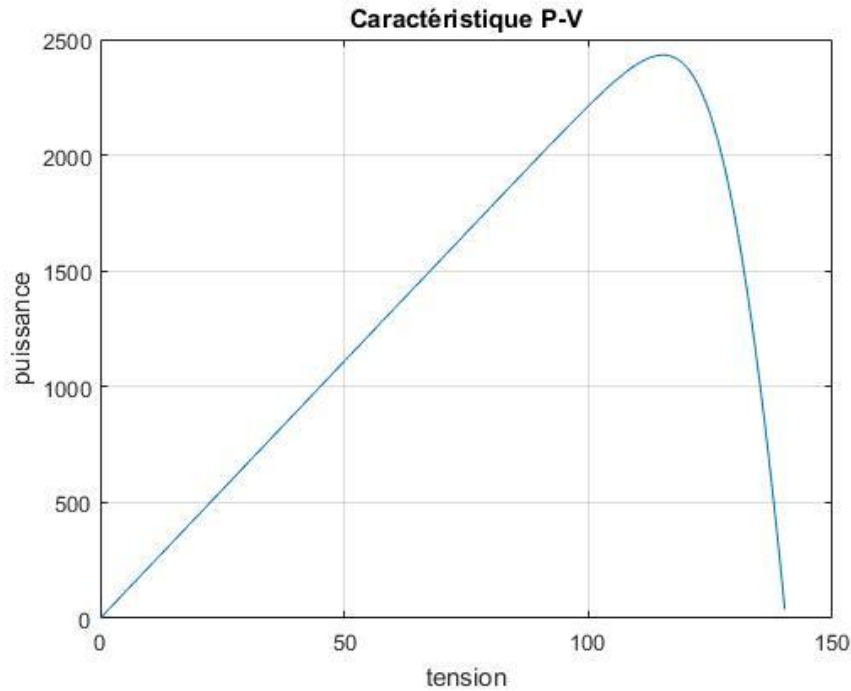


Figure III.9. Caractéristique puissance en fonction de la tension $P=f(U)$.

III.6.1.1. Influence des paramètres climatiques sur les courbes

➤ Influence de l'irradiation :

La variation de l'irradiation a un effet sur le fonctionnement et la production énergétique de système : cette influence est exprimée par les figures III.10 et III.11 :

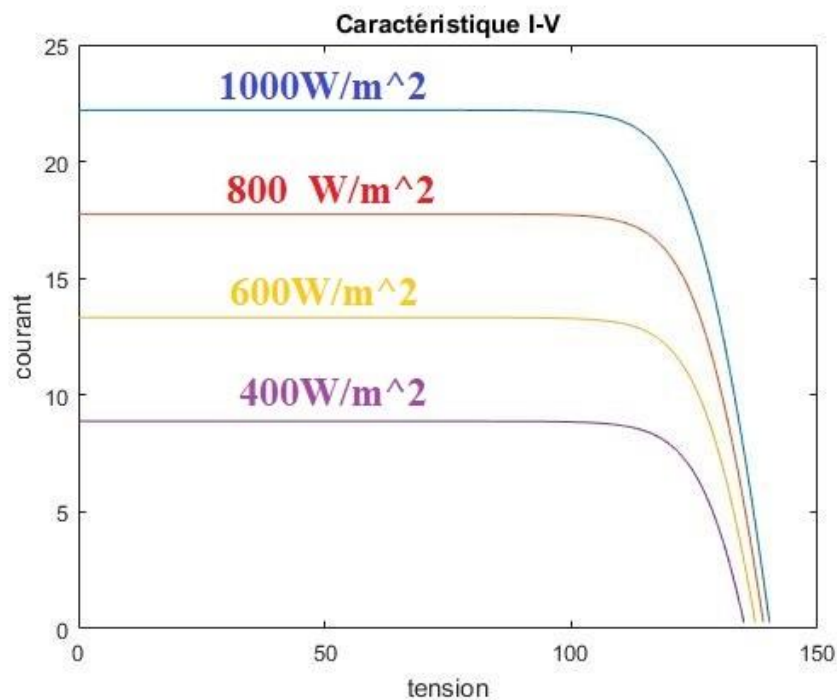


Figure III.10. Caractéristique $I=f(V)$ en fonction de l'irradiation

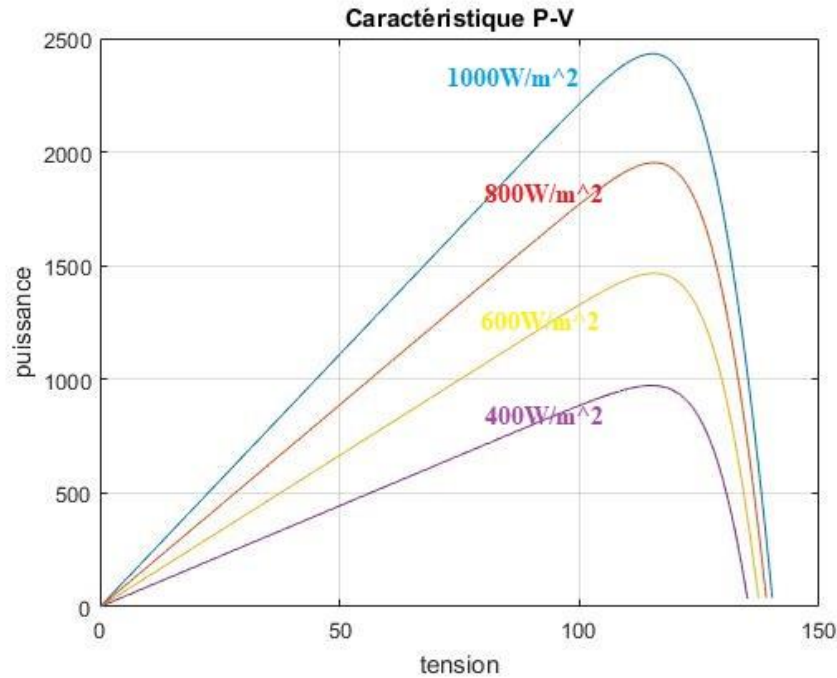


Figure III.11. Caractéristique $P=f(V)$ en fonction de l'irradiation

Il est clair que la variation de l'irradiation entraîne un changement important du courant. Plus l'irradiation diminue plus le courant diminue. Le même phénomène est observé sur la courbe de la puissance, puisque cette dernière est proportionnelle au courant délivré par générateur. Cependant, on remarque une légère variation de la tension.

➤ **Influence de la température :**

La température est l'un des paramètres qui joue un grand rôle sur l'influence du fonctionnement des modules à cause de la sensibilité des cellules lors de la variation de la température. Les figures III.12 et III.13 représentent l'influence de la température sur le fonctionnement de générateur. Dans notre simulation le champ est exposé à une irradiation constante (1000W/m^2) et différentes températures.

On remarque que la variation de la température provoque une diminution de la puissance de sortie à cause de la diminution de la tension et la diminution légère du courant de sortie.

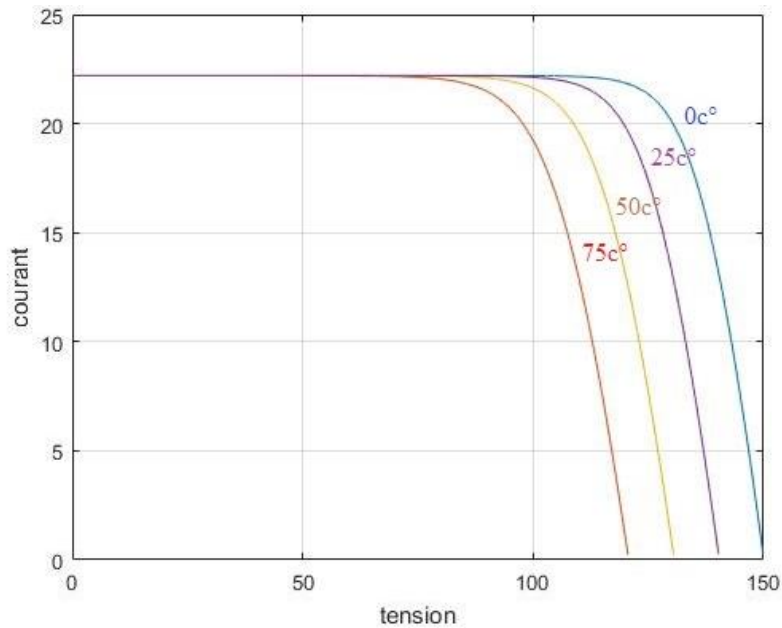


Figure III.12. Caractéristique $I=f(V)$ en fonction de la température

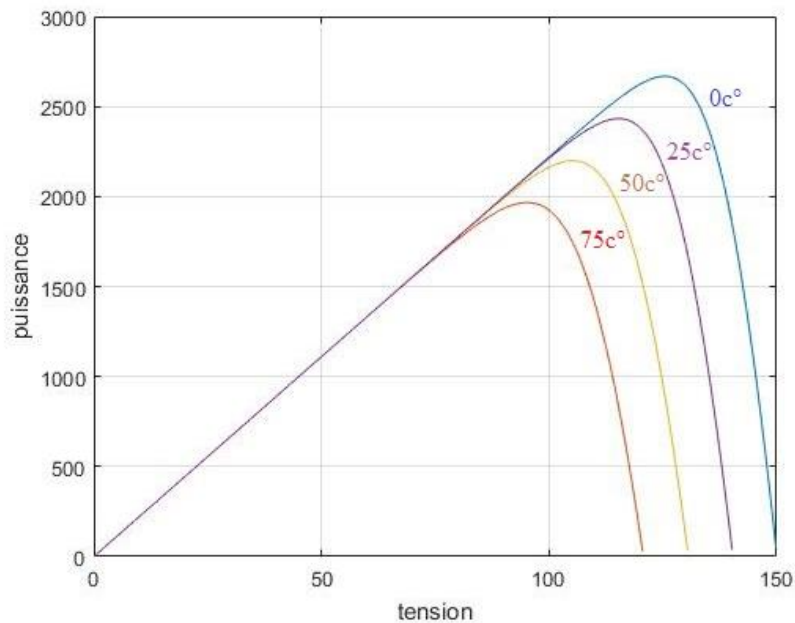


Figure III.13. Caractéristique $P=f(V)$ en fonction de la température

III.6.2. Résultat de Simulation de l'onduleur et motopompe

Les figures III.14 et III.15 repésent les tensions simples (V_a , V_b et V_c) et Zoom de la tension simple V_a et la figures III.16 représente les trois ondes de référence avec la porteuse ($f_r=50\text{Hz}$, $F_p=2000\text{Hz}$).

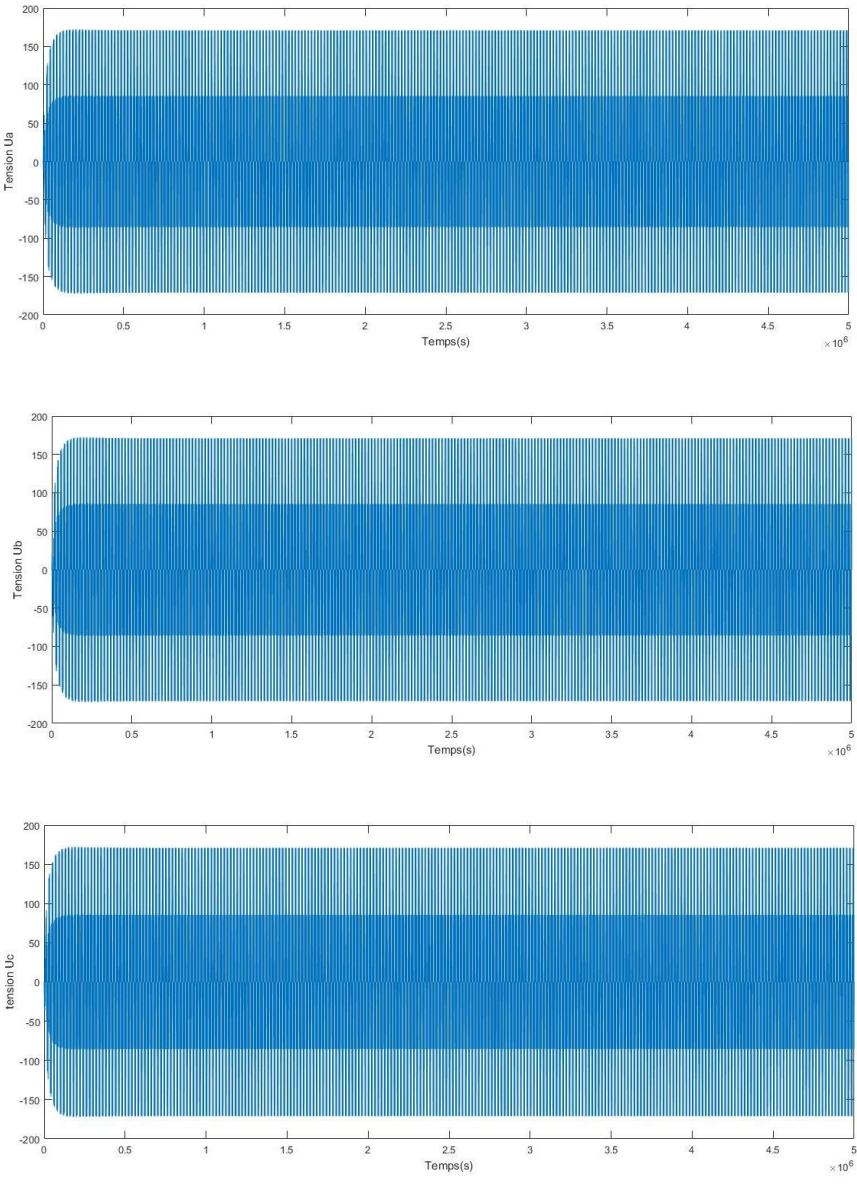


Figure III.14. Les tensions simples (U_a , U_b , U_c) à la sortie d'onduleur

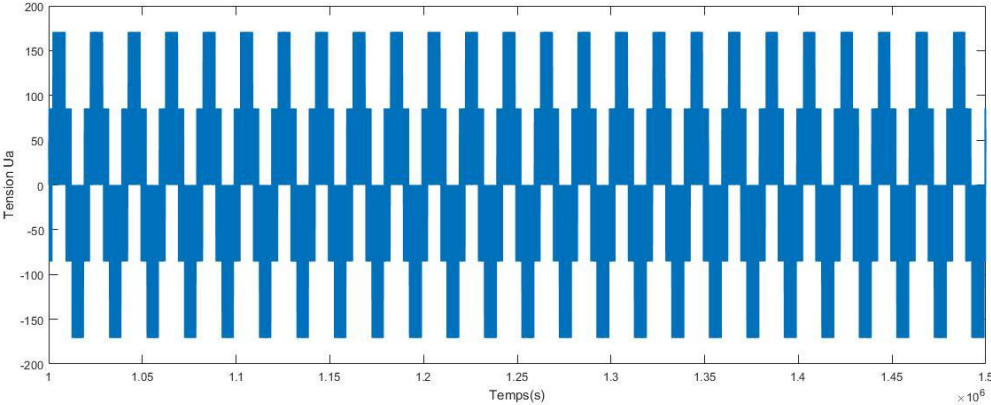


Figure III.15. Zoom de la courbe de la tension simple U_a

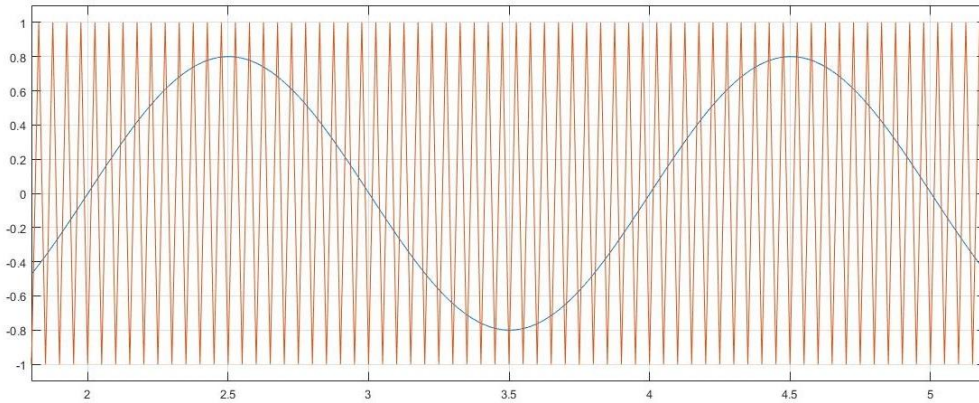


Figure III.16. Courbe de la porteuse et la référence

Les figures III.17 et III.18 repésent la vitesse et le couple électromagnétique délivré par le moteur asynchrone à vide puis en charge $C_r=10,5$ N.m à partir de $t=1,2$ s. Il est clair que le moteur démarre à vide et se stabilise à une vitesse 1400 tr/min, par la suite la vitesse diminue à cause de la charge.

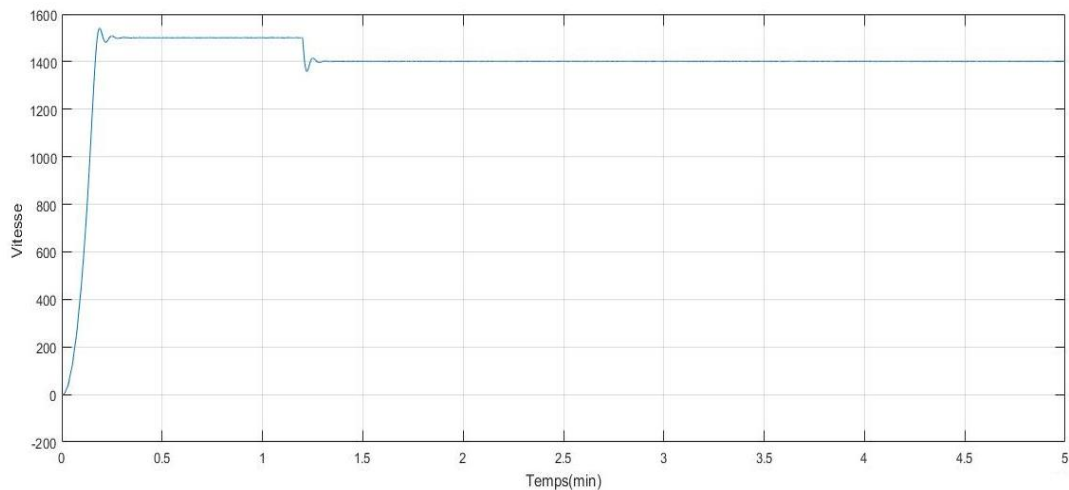


Figure III.17. Courbe de la variation de vitesse (tr/min) en fonction de temps

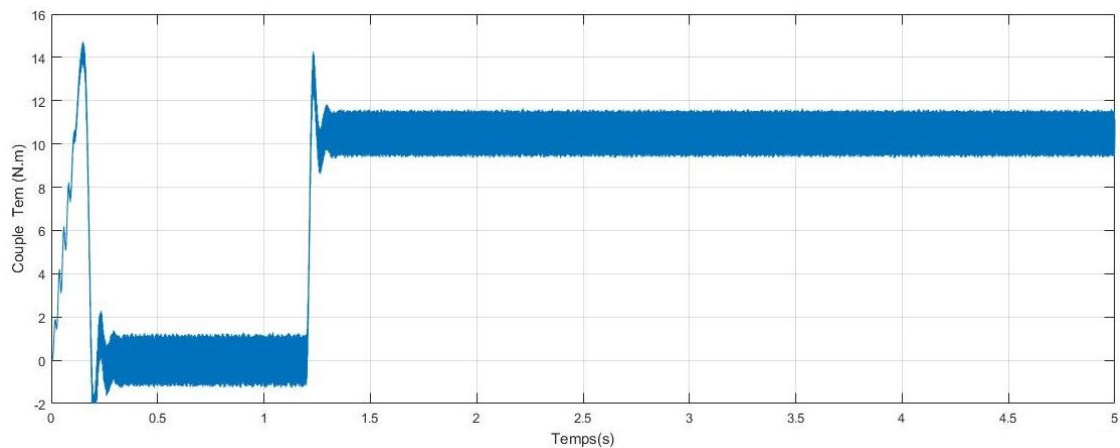


Figure III.18. Courbe de la variation du couple moteur (C_{em})

La Figure III.19 représente variation de Débit de la pompe en fonction de temps. Il est clair que le débit de la pompe suit la variation de couple électromagnétique du moteur et se stabilise à un débit 4,692 (m^3/h), figure III.20. Ce résultat confirme les calculs faits dans le chapitre 2.

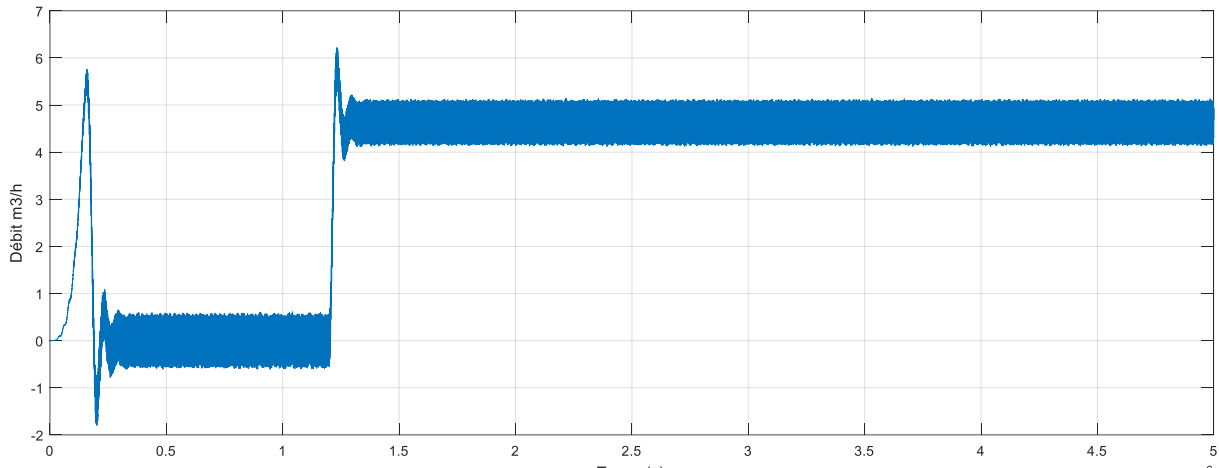


Figure III.19. Courbe de variation de Débit (m^3/h)

La valeur numérique du débit :

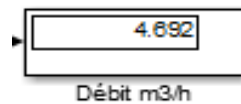


Figure III.20. La valeur de débit entre le scope

Pour une HMT= 41.23 de notre site, nous obtenons un débit de $4.692\text{m}^3/\text{h}$ avec une puissance 1560 w qui sont proche aux résultats du rapport PVsystem.

La figure III.21 représente le débit en fonction de la vitesse. On remarque que le débit augmente lentement pour des valeurs de vitesse jusqu'à une vitesse 70rad/s , puis la courbe évolue d'une manière presque linéaire jusqu'à la valeur finale.

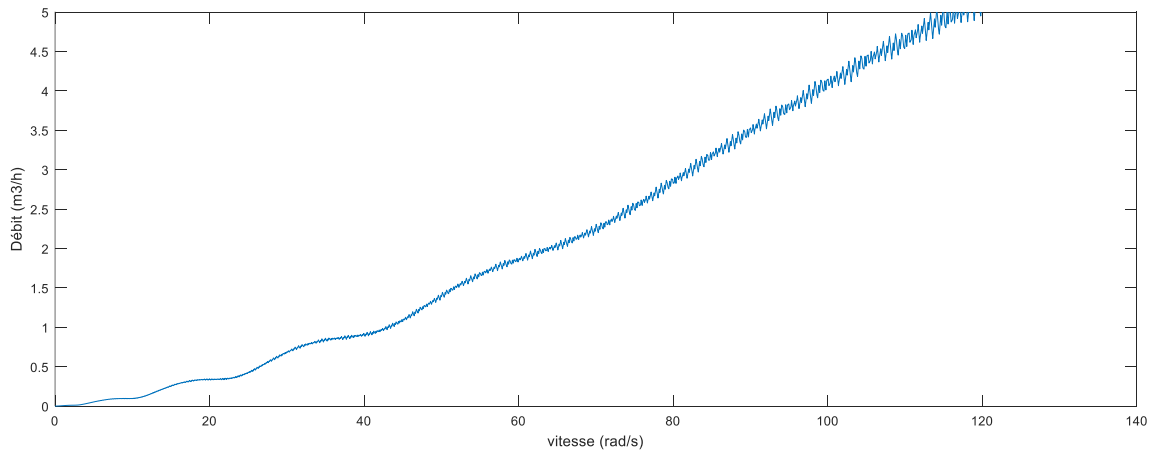


Figure III.21. Le débit m^3/h en fonction de la vitesse

III.6.3 Influence de l'irradiation sur le système global

Le profil de variation de l'irradiation est donné par la figure III.22. La tension de sortie de l'onduleur est donnée par la figure III.23. Il est clair que la tension de sortie de l'onduleur diminue avec la diminution de l'irradiation car la tension continue à la sortie du panneau diminue aussi.

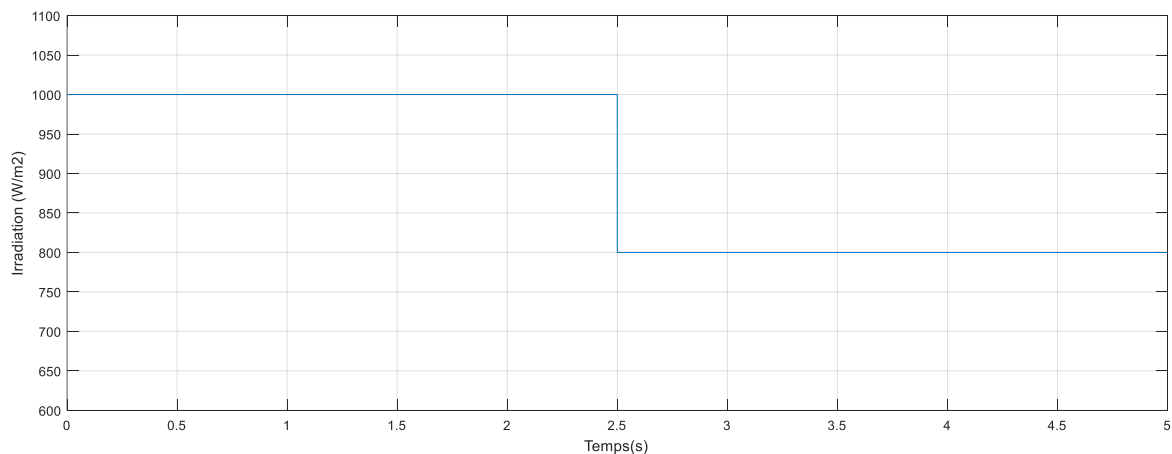


Figure III.22. La variation de l'éclairement en fonction de temps

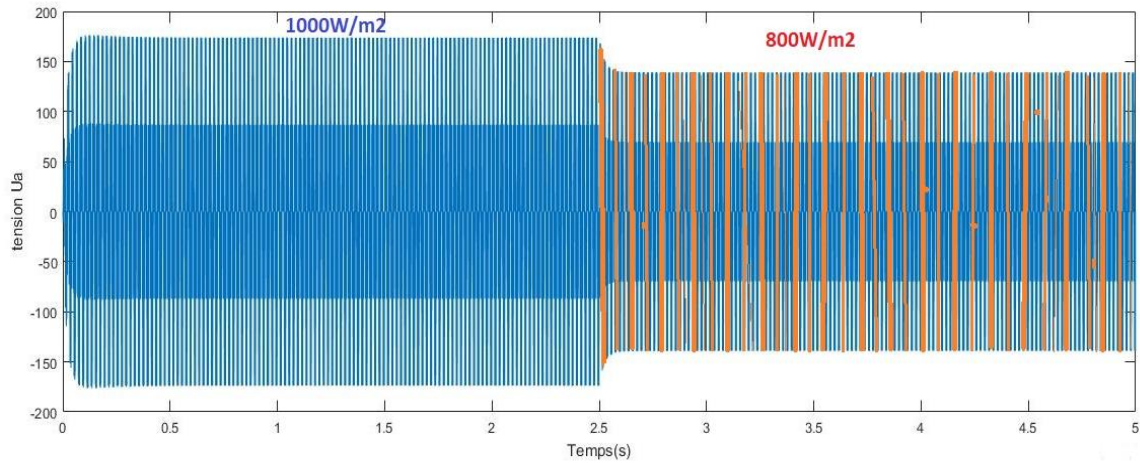


Figure III.23. La tension composée dans la sortie d'onduleur

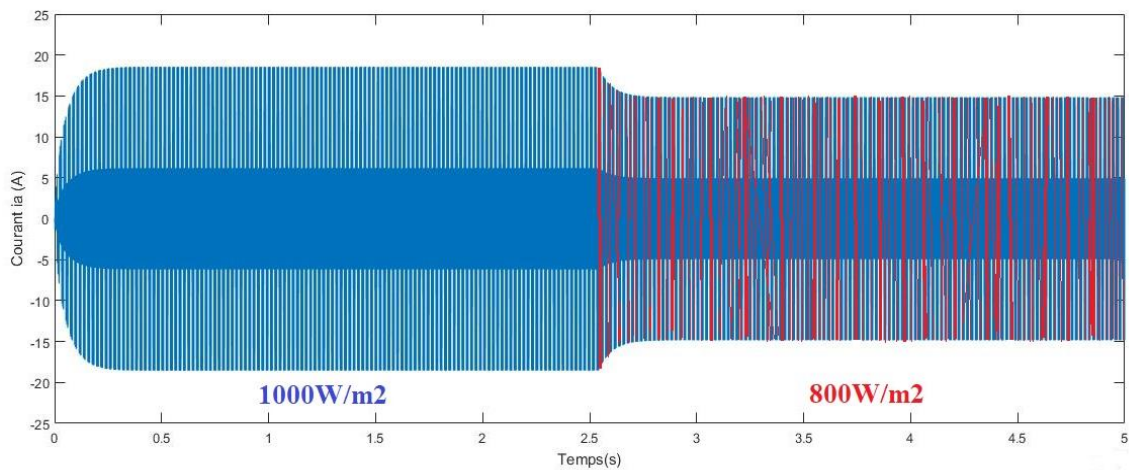


Figure III.24. Le courant dans la sortie d'onduleur

De plus, on remarque aussi que la vitesse de moteur diminue aussi figure III.25. Cette diminution de l'éclairement influe automatique sur le débit de la pompe utilisée, figure III.26, car le débit de la pompe est lié à la puissance électrique et la vitesse.

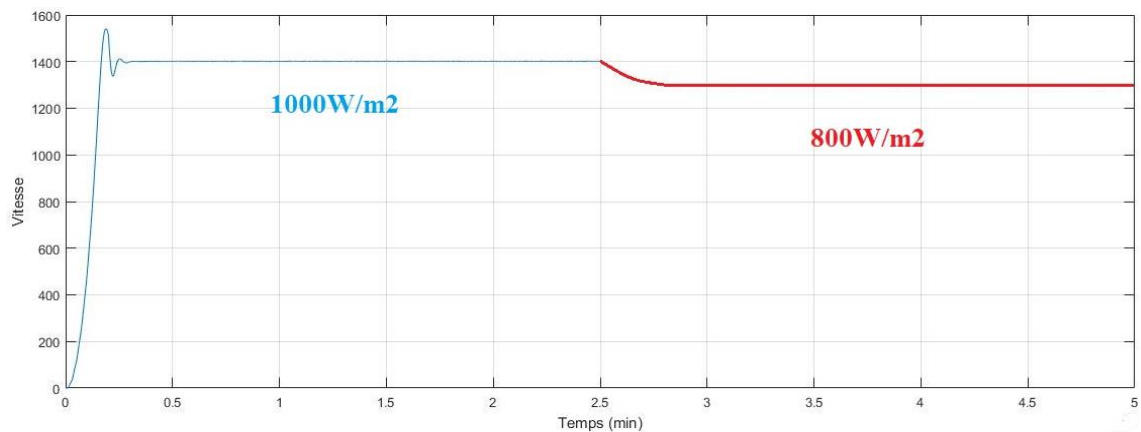


Figure III.25. La vitesse de moteur en fonction de temps

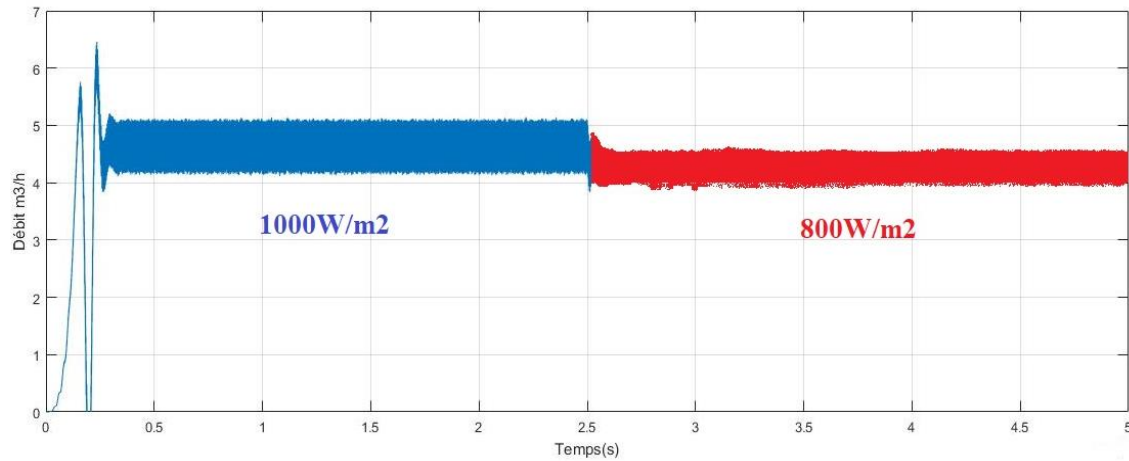


Figure III.26. La variation de Débit en fonction de temps

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons testé notre système par simulation basée sur la modélisation du système adopté et en se basant sur les paramètres trouvés dans le chapitre de dimensionnement. On a commencé par la modélisation de panneau photovoltaïque, l'

onduleur triphasé, la MAS en se basant sur les équations qui régissent le comportement de la machine et la pompe centrifuge. En fin, on distingue que le débit de la pompe est proportionnel à l'énergie électrique fournie par le panneau photovoltaïque.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a été consacré au dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome destiné à l'alimentation d'une région rurale appartenant à la wilaya de souk Ahras. Le dimensionnement de ce système a été fait pour déterminer les spécifications appropriées de ses composants, afin de fournir une alimentation en eau efficace et fiable à partir de l'énergie solaire. Le système choisi est composé d'une pompe centrifuge multi-étages, d'un moteur asynchrone et d'un panneau photovoltaïque.

De plus, dans ce mémoire, nous avons exposé le dimensionnement de notre système de pompage adopté et tous les calculs qui ont une relation avec à ce système.

Nous avons commencé d'abord par le calcul des besoins journaliers de notre ferme. Cela nous a permis de dimensionner et choisir de la pompe. Par la suite, nous avons déterminé le type de moteur ainsi que l'onduleur nécessaire pour convertir l'énergie à courant continu en énergie en courant alternatif. Enfin, le dimensionnement du champ photovoltaïque a été fait sur la base des calculs précédents.

Par la suite, une modélisation et simulation du système choisi a été faite sur la base des paramètres trouvés auparavant. Les résultats numériques obtenus, montrent l'exactitude et l'efficacité énergétique de notre système. Ce travail démontre tout l'intérêt de développer l'utilisation de cette forme d'énergie, très largement disponible dans notre pays.

Enfin, on peut conclure que le pompage photovoltaïque est une solution durable, économique et polyvalente pour l'approvisionnement en eau dans les zones éloignées ou mal desservies en électricité. Il offre une alternative fiable et respectueuse de l'environnement aux systèmes de pompage traditionnels et contribue à améliorer l'accès à l'eau, l'agriculture durable et la qualité de vie des communautés.

Références Bibliographique

Références Bibliographique

- [1]: **Z. Abdelmalek, EL. Ayoub** "Conception d'un système PV/diesel non autonome pour le pompage de l'eau". Mémoire de master, Université de Biskra, 2019/2020
- [2]: **M. Bassem Abdelghani** " Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque". Mémoire de master, Université Badji Mokhtar –Annaba, 2018
- [3]: **T. nihed, K. iskander** "énergie solaire photovoltaïque et système photovoltaïque autonome". Mémoire de master, Université Badji Mokhtar -Annaba, 2020/2021
- [4]: **ir. Erik van de Giessen MSc, Co-auteurs : Ebo Roek BSc , Gertjan Bom BSc, Stéphan Abric MSc , Robert Vuik MSc,** " LE POMPAGE SOLAIRE Appliqué aux Adductions d'Eau Potable en milieu rural Pour les cadres techniques du secteur public et privé ". Réalisé par PRACTICA Fondation
- [5]: **S.Shen, M. Zhang, D.Urry,** "Manuel d'enseignement des énergies renouvelable". Block 19, No.2 Suide Rd. Shanghai 200331, P.R. China
- [6]: **S. C. W. Krauter,** " Solar electric power generation - photovoltaic energy systems modeling of optical and thermal performance, electrical yield, energy balance, effect on reduction of greenhouse gas emissions " Berlin, Springer, 2006.
- [7]: **Roger.A, Messenger and, Jerry.V,** "photovoltaic Systems engineering, second edition", CRC Press LLC, 2004.
- [8]: " WWW.WEAKEPDIRA.COM " .
- [9]: **J-C. Sabonadiere.** "Nouvelles technologie de l'énergie" les énergies renouvelable 2006.
- [10]: **B.EQUER,** " Énergie solaire photovoltaïque " Volume 1, physique et technologie de la conversion photovoltaïque publié par l'organisation des Nations unies pour l'éducation la science et la culture 7.place de Fontenoy, 75700 paris, France (c) UNESCO 1991.
- [11]: **M.villoz, A.labouret,** "énergie solaire photovoltaïque "4e édition DUNOD 16/10/2009.
- [12]: **Roger. A. Messenger et J. Ventre,** " Photovoltaic systems engineering ", 2nd ed. Boca Raton, CRC Presse, 2004.
- [13]: **H. Abderrazzak,** " Conception et dimensionnement d'un système Photovoltaïque pour habitation et pompage " , Mémoire de master 2017 – 2018, Université Mohamed Khider de Biskra.
- [14]: **L.SEIDOU.Imorou,** "Etude et dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïque dans les localités rurales du bénin : cas de Adjakpata", Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur 2ie avec le grade de master, Promotion 2015/2016 Institut International d'Ingénierie. BURKINA.

Références Bibliographique

- [15]: **J. Royer, T. Djiako, E. SCHILLER, B. Sada**, "le pompage photovoltaïque", manuel de cour à l'intention des ingénieurs et des techniciens.
- [16]: **G.Séguier, F.Labrique, P.Delarue**, " Electronique de puissance. Structures, commandes, applications " 10^{ème} édition, DUNOD.
- [17]: **A.Lynda, Z.Djamila, D.Madiha**, " étude d'un système de pompage photovoltaïque", Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou 2012/2013.
- [18]: **B. Abdelkader**, " Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph", Mémoire de magister, Université de Sétif, Décembre 2009.
- [19]: " http://physiquejv1.free.fr/Documents/STS2/Cours/Source/Cours_STS2_13_Onduleurs.doc (consultés le 12 avril 2019)".
- [20]: **A. Labouret, M. Villoz**, " Energie solaire photovoltaïque ", 3^{ème} Edition DUNOD, 2007.
- [21]: **B. Alimarina, Z. Aoua**, " Etude et conception d'une armoire de commande à démarreur électronique progressif –application à un groupe électropompe d'une station de pompage d'eau potable ", Mémoire DEUA en Electrotechnique, UMMTO 2006.
- [22]: "https://www.thermexcel.com/french/ressourc/dimensionnement_pompe_pompes_circulateur.htm?fbclid=IwAR0mIllzUnXdck4kGBt0vqVP3jdp2E3xk18g2cqiEiPUzGXiZ9HsWbWMoo"
- [23]: **Bouzidi.Belkacem**, " Contribution à l'amélioration du pompage d'eau par l'énergie renouvelables", thèse de Doctorat en science, 2010/2011.
- [24]: " https://tech-alim.univ-lille.fr/intro_gia/co/ch03_05.html ".
- [25]: **B.Ismail, D.Hamit**, " Etude technico-économique de système de pompage photovoltaïque, en comparaison aux autres productions d'eau, cas de la région de Mostaganem ", Mémoire de Master, Université Abdelhamid ibn Badis Mostaganem, 2018/2019 .
- [26]: "<https://www.labonnepompe.com/blog/comment-choisir-son-tuyau-de-refoulement-n30>".
- [27]: **Z.Soufiane, B.Slimane**, " Etude et dimensionnement d'un centrale Photovoltaïque ", Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2019/2020.
- [28]: " <https://fr.weatherspark.com/y/55167/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-Souk-Ahras-Alg%C3%A9rie-tout-au-long-de-l%E2%80%99ann%C3%A9e> "
- [29]: "<https://partir.ouest-france.fr/meteo/souk-ahras-idville-1660.html>".
- [30]: " <http://hikersbay.com/climate/algeria/soukahras?lang=fr>".
- [31]: **Pr. Toufouti.R**, " la modélisation de la machine Asynchrone " cour, Université Mohamed Cherif Messaadia Souk ahras, 2021/2022.

Annexe

Panneau solaire

- Modules PV 400W Panneaux solaire mono 400 Wp 72 cellules :

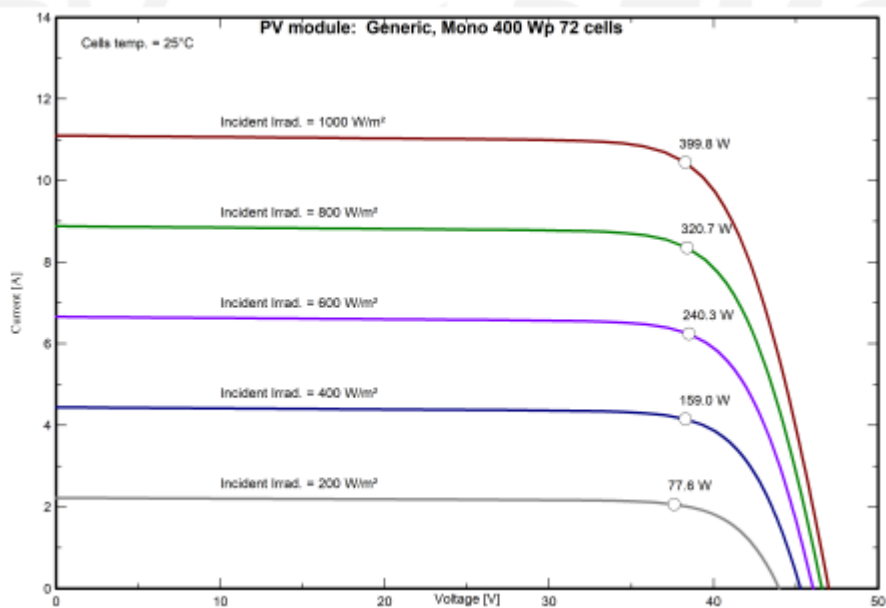


Annexe. 1. Panneau solaire utilisé

- Caractéristique de panneau solaire utilisé :

PV module - Mono 400 Wp 72 cells			
Manufacturer	Generic	Commercial data	
Model	Mono 400 Wp 72 cells	Availability :	Prod. Since 2020
		Data source :	Typical
Phom STC power (manufacturer)	400 Wp	Technology	SI-mono
Module size (W x L)	1.052 x 2.131 m ²	Rough module area (Amodule)	2.24 m ²
Number of cells	1 x 72	Sensitive area (cells) (Acells)	1.98 m ²
Specifications for the model (manufacturer or measurement data)			
Reference temperature (TRef)	25 °C	Reference irradiance (GRef)	1000 W/m ²
Open circuit voltage (Voc)	47.0 V	Short-circuit current (Isc)	11.10 A
Max. power point voltage (Vmpp)	38.4 V	Max. power point current (Impp)	10.41 A
=> maximum power (Pmpp)	399.7 W	Isc temperature coefficient (muIsc)	6.7 mA/°C
One-diode model parameters			
Shunt resistance (Rshunt)	300 Ω	Diode saturation current (IoRef)	0.100 nA
Series resistance (Rserie)	0.30 Ω	Voc temp. coefficient (muVoc)	-146 mV/°C
Specified Pmax temper. coeff. (muPMaxR)	-0.37 %/°C	Diode quality factor (Gamma)	1.00
		Diode factor temper. coeff. (muGamma)	0.000 1/°C
Reverse Bias Parameters, for use in behaviour of PV arrays under partial shadings or mismatch			
Reverse characteristics (dark) (BRev)	3.20 mA/V ²	(quadratic factor (per cell))	
Number of by-pass diodes per module	3	Direct voltage of by-pass diodes	-0.7 V
Model results for standard conditions (STC: T=25 °C, G=1000 W/m², AM=1.5)			
Max. power point voltage (Vmpp)	38.3 V	Max. power point current (Impp)	10.51 A
Maximum power (Pmpp)	399.8 Wp	Power temper. coefficient (muPmpp)	-0.37 %/°C
Efficiency/(Module area) (Eff_mod)	17.8 %	Fill factor (FF)	0.766
Efficiency/(Cells area) (Eff_cells)	20.1 %		

Annexe. 2. La Fiche Technique de ce Panneau



Annexe. 3. Electricité produit en fonction de variation de l'ensoleillement

L'onduleur



Annexe. 4. Onduleur utilisé

- Caractéristique d'onduleur :

Pumping system controller - Universal Fixed V DC - AC Inverteer		
Commercial data		
Manufacturer	Generic device	Data Parameters adjusted according to the system
Model	Universal Fixed V DC - AC Inverteer	
Pump protection and system controls		
Even when the pump is directly coupled to the PV array, a control device may (or should) ensure the following protections:		
Main Switch (manual control) - Not used in the simulation		
Level Switch for stopping operation when Tank is full		
Pump Inlet: Level Sensor/Switch for preventing dry operation		
This control device should also ensure the following protections on each controlled pump:		
Max. power protection		1960 W/Pump
Max. voltage protection		140 V/Pump
Max. current protection		15 A/Pump
Protection mode:		Cut
Pump temperature protection - Not used in the simulation		
System Operating Control		
Generic device params adjusted acc. to the system		
Power Conditioning Unit		
Type	Fixed DC-AC Inverter	
Operating conditions		
Nominal power	1960 W	
Power Threshold	20 W	
Max. efficiency	97.5 %	
EURO efficiency	95.5 %	
Fixed Input Voltage	100 V	
Maximum Array Voltage	140 V	
Maximum Input Current	15.0 A	
Commercial data		
Remarks and Technical features		
Generic regulator for pumping systems.		
The parameters are pre-setted according to the system (pumps and Array), at the beginning of the simulation.		
Unlike exceptions, they are not modifiable by the user.		

Annexe. 5. La fiche technique d'Onduleur

La pompe

- Marque Grundfos



Annexe. 6. La pompe centrifuge (GRUNDFOS)

- Caractéristique de pompe centrifuge utilisée :

Pump - SP 3A-10 120V

Manufacturer Model	Grundfos SP 3A-10 120V	Commercial data Data source : Remarks and Technical features Submersible Centrifugal Pump, 10 stages, stainless steel Protected against Dry-running or Blocking Motor: MS 402, 2-pole 3-phase AC, asynchronous, stainless steel 3 x 65V, Nom. power at 50 Hz: 550W, Max 1200 W Controller / Inverter: SA 1500 (217 x 150 x 275mm, 4.4 kg, IP55) : MPPT, Control and fault indication (LED), Temperature, Overload, short-circuit protection Low/High Voltage protection Sizes Width Height Depth Weight	Manufacturer 101 mm 667 mm 101 mm 14.60 kg
------------------------------	---------------------------	---	--

General pump parameters

Layout	Deep well pump
Technology	Centrifugal Multistage
Motor	AC motor, triphased
Power converter	MPPT converter

Operating conditions

	Head min.	Head Nom	Head max.	
Corresp. Flowrate	30.0	50.0	70.0	m
Req. power	5.08	4.20	3.04	m ³ /h
Efficiencies	1500	1500	1500	W
	27.7	38.2	38.6	%

Other parameters

Absolute maximum ratings	PMax abs.	1960 W	U Max abs.	140 V	I Max abs.	15.0 A
MPPT voltage range	U Min	100.0 V	Vmax	140.0 V		
Converter efficiency	EURO efficiency	95.5 %	Max. efficiency	97.5 %		

Data for the model
Flowrate vs power for some heads

Pump parameter tables

Head 30.0 meterW

Power	500	1000	1400	1800	W
FlowR	2.550	3.950	4.900	5.500	m ³ /h

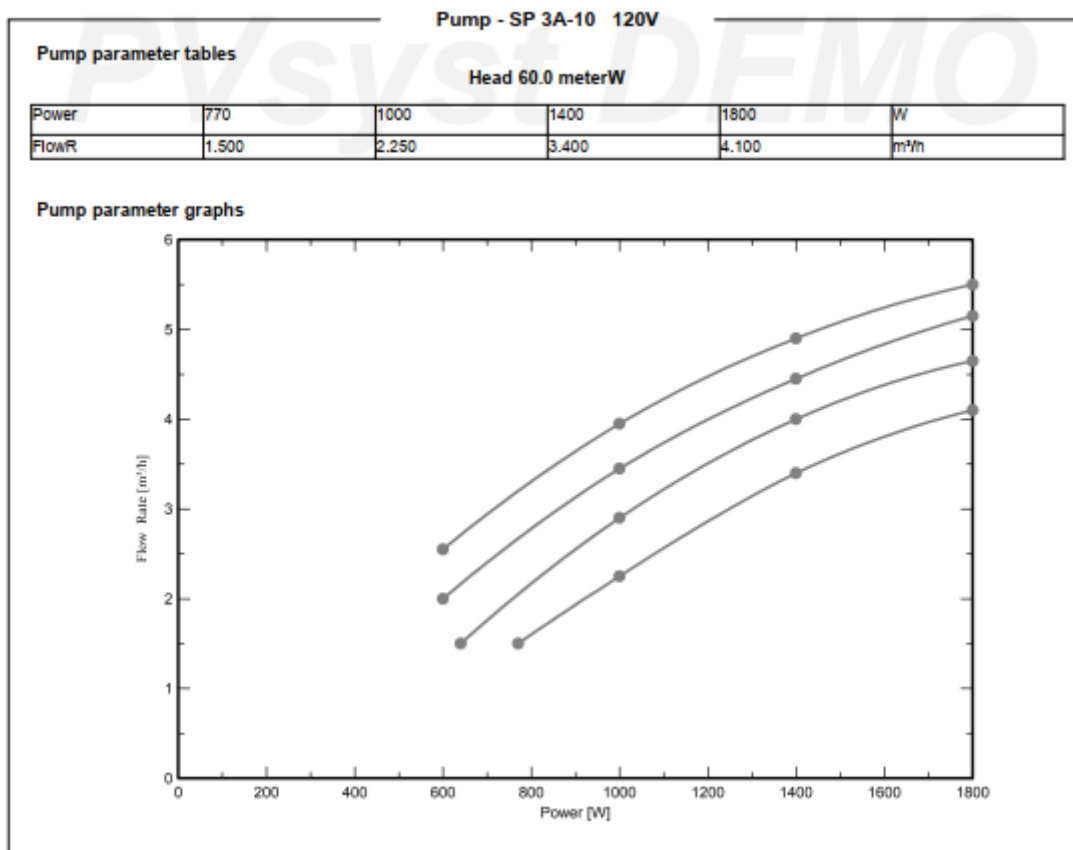
Head 40.0 meterW

Power	500	1000	1400	1800	W
FlowR	2.000	3.450	4.450	5.150	m ³ /h

Head 49.9 meterW

Power	540	1000	1400	1800	W
FlowR	1.500	2.900	4.000	4.650	m ³ /h

Annexe. 7. La fiche Technique de pompe centrifuge



Annexe. 8. Débit de cette pompe en fonction de la puissance