

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



Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



PROJET DE FIN D'ÉTUDES

MASTER

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique

Thème

Analyse des effets d'ensoleillement et de la température sur les performances d'un système de pompage solaire

Préparé par :

MISSOUM Wafaa Rihem et GUELFOUT Hamida

Soutenu publiquement le 24/06/2024, devant le Jury composé de :

M. HAMMOU Mahmoud	Maître de Conférences « B » (Univ. Ibn Khaldoun de Tiaret)	Président
M. ABED Belkacem	Maître de Conférences « A » (Univ. Ibn Khaldoun de Tiaret)	Examinateur
M. MEKROUSSI Said	Professeur (Univ. Ibn Khaldoun de Tiaret)	Examinateur
M. HADDOUCHE Kamel	Professeur (Univ. Ibn Khaldoun de Tiaret)	Encadrant

Année universitaire : 2023 - 2024

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail à :

Nos chers parents

Nos frères et sœurs

Toutes nos familles

Tous nos amis.

Remerciements

Nous tenons d'abord à exprimer notre profonde gratitude à Dieu pour nous avoir accordé la force, la persévérance et la clarté d'esprit nécessaires pour mener à bien ce projet.

Nous voudrions également adresser nos sincères remerciements à notre encadrant, Monsieur HADDOUCHE Kamel, pour son soutien indéfectible, ses conseils éclairés et sa disponibilité tout au long de cette étude. Sa précieuse expertise et son accompagnement ont grandement contribué à la réussite de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du Jury, Messieurs HAMMOU Mahmoud, ABED Belkacem et MEKROUSSI Said pour avoir accepté d'examiner ce modeste travail avec bienveillance.

Nous tenons particulièrement à remercier Monsieur HACHEMI Islam pour son aide précieuse. Son expertise, ses conseils et sa disponibilité ont été d'une grande valeur et ont grandement facilité l'avancement de notre travail.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance envers nos enseignants en particulier Messieurs KARAS Abdelkader et AKERMI Nasreddine pour leurs soutiens constants tout au long de notre parcours académique.

Nous souhaitons également adresser nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, que ce soit par leurs encouragements, leurs soutiens logistiques ou leurs expertises techniques.

Enfin, nous tenons à remercier chaleureusement nos familles et nos amis pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leur compréhension tout au long de cette période intense de travail.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur l'énergie et le pompage solaire	2
I.1 Introduction.....	2
I.2 Diversité énergétique	2
I.3 Energies renouvelables	4
I.3.1 Énergie éolienne.....	4
I.3.2 Énergie hydraulique.....	4
I.3.3 Énergie géothermique.....	5
I.3.4 Énergie bio-massique.....	5
I.4 Energie solaire	6
I.4.1 Filières d'exploitations de l'énergie solaire	6
I.4.1.1. Énergie solaire thermique.....	6
I.4.1.2. Énergie solaire thermodynamique.....	7
I.4.1.3. Énergie solaire photovoltaïque.....	8
I.4.2 Avantages et les inconvénients environnementaux de l'énergie solaire.....	8
I.5 Système de pompage solaire	9
I.5.1 Source d'énergie solaire	9
I.5.2 Rayonnement solaire.....	9
I.5.3 Gisement et irradiation solaire.....	10
I.5.4 Solutions énergétiques pour le pompage d'eau	11
I.5.5 Intérêts du pompage solaire [28].....	12
I.5.6 Composantes d'un système de pompage solaire.....	12
I.6 Conclusion	14
Chapitre II : Modélisation et optimisation du système de pompage solaire	15
II.1 Introduction	15
II.2 Panneaux photovoltaïques	15
II.2.1. Modélisation de la cellule photovoltaïque	15
II.2.2. Modélisation d'un générateur photovoltaïque	16
II.2.3. Influence de l'irradiation et de la température sur la caractéristique I-V	16
II.3 Onduleur de tension.....	18
II.4 Moteur d'entraînement de la pompe	19
II.5 Pompe.....	20
II.5.1. Caractéristique Hauteur/Débit :	21
II.5.2. Caractéristique Rendement/Débit :	22
II.5.3. Caractéristique Couple/Débit :	23
II.6 Pertes de charge dans le circuit hydraulique	23
II.6.1. Pertes de charge linéaires	23
II.6.2. Perte de charge singulières :	24
II.7 Optimisation du système de pompage solaire.....	25
II.7.1. Point de fonctionnement	26
II.7.2. Quelques types d'algorithmes de tracking.....	27

Table des matières

II.8	Conclusion :	29
Chapitre III : Simulation du système de pompage solaire		30
III.1	Introduction	30
III.2	Présentation du projet	30
III.3	Caractéristiques et pré-dimensionnement du système de pompage solaire	31
III.3.1	Caractéristiques du site cible	31
III.3.2	Caractéristiques du forage	31
III.3.3	Besoins en eau et réservoir de stockage	31
III.3.4	Caractéristiques du circuit hydraulique	32
III.4	Simulation du système de pompage solaire sous PVsyst	32
III.4.1	Données et besoins d'eau	32
III.4.2	Détermination des pressions	34
III.4.3	Choix de la pompe	35
III.4.4	Choix du panneau PV	35
III.4.5	Résultats de simulation sous le logiciel PVsyst	36
III.4.5.1	Performances de la pompe	38
III.4.5.2	Performances du générateur PV	39
III.5	Simulation du système de pompage solaire sous Matlab	40
III.5.1	Description du modèle et données de simulation	40
III.5.2	Résultats de simulation sous Matlab	42
III.5.2.1	Débit de la pompe	42
III.5.2.2	Vitesse de rotation de la pompe	43
III.5.2.3	Couple résistant	43
III.5.2.4	Puissance débitée par le générateur PV	44
III.5.2.5	Influence de l'ensoleillement et de la température	44
III.6	Interprétation des Résultats	46
III.7	Conclusion	46
Conclusion générale		48
Références bibliographiques		
Résumé		

Chapitre I : Généralités sur l'énergie et le pompage solaire

Figure I-1 : Sources et formes de l'énergie [3].....	3
Figure I-2 : Energie éolienne [6].	4
Figure I-3 : Energie hydraulique [8].....	4
Figure I-4 : Energie géothermique [10].....	5
Figure I-5 : Energie bio-massique [12].....	5
Figure I-6 : Cas d'énergie solaire thermique [15].....	7
Figure I-7 : Cas d'énergie solaire thermodynamique [17].....	7
Figure I-8 : Energie solaire photovoltaïque [18].	8
Figure I-9 : Différents rayonnements solaires [23].	10
Figure I-10 : Composantes du système de pompage solaire [29].	13

Chapitre II : Modélisation et optimisation du système pompage solaire

Figure II-1 : Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque [31].....	15
Figure II-2 : Cellule et panneau photovoltaïque [32].....	16
Figure II-3 : Influence de l'irradiation sur la caractéristique I-V pour une température fixée.	17
Figure II-4 : Influence de la température sur la caractéristique I-V pour une irradiation fixée.	17
Figure II-5 : Principe de modulation sinus-triangle [34].	18
Figure II-6 : Caractéristique typique $H(Q)$ de la pompe pour une vitesse fixée [33].	21
Figure II-7 : Caractéristique typique $\eta(Q)$ de la pompe pour une vitesse fixée [33].	22
Figure II-8 : Caractéristique typique $C_r(Q)$ de la pompe pour une vitesse fixée.	23
Figure II-9 : Variation du MPP avec l'ensoleillement pour une température fixée [33].	25
Figure II-10 : Variation du MPP avec la température pour une irradiation fixée [33].	26
Figure II-11 : Fonctionnement d'un panneau photovoltaïque.	27
Figure II-12 : Illustration du fonctionnement de l'algorithme "P&O" [35].....	28

Chapitre III : Simulation du système pompage solaire

Figure III-1 : Schéma d'un système de pompage solaire.	30
Figure III-2 : Localisation du site.	31
Figure III-3 : Définition des besoins d'eau et résumé annuel.....	33
Figure III-4 : Détermination des pressions.	34
Figure III-5 : Choix de la pompe, du panneau et du mode de régulation.	36
Figure III-6 : Résultats de simulation sur PVsyst.	37
Figure III-7 : Débit en fonction de l'irradiation.....	38
Figure III-8 : Débit en fonction de la puissance à la pompe.....	39
Figure III-9 : Température moyenne en fonction de l'irradiation.	39
Figure III-10 : Modèle de la simulation sous Matlab.	40
Figure III-11 : Caractéristique $H(Q)$ de la pompe cible.....	41
Figure III-12 : Caractéristique $\eta(Q)$ de la pompe cible.	41

Liste des figures

Figure III-13 : Evolution du débit de la pompe.	42
Figure III-14 : Evolution de la vitesse de rotation de la pompe.	43
Figure III-15 : Couple résistant en fonction du temps.	43
Figure III-16 : Puissance débitée par le générateur PV.	44
Figure III-17 : Evolution du débit de la pompe ($G = 500 \text{ W/m}^2$ et $T = 35 \text{ °C}$).	45
Figure III-18 : Evolution de la vitesse de la pompe ($G = 500 \text{ W/m}^2$ et $T = 35 \text{ °C}$).	45
Figure III-19 : Puissance débitée par le générateur PV ($G = 500 \text{ W/m}^2$ et $T = 35 \text{ °C}$).	46

Chapitre III : Simulation du système pompage solaire

Tableau III-1 : Résumé des résultats principaux.	37
Tableau III-2 : Bilans et principaux résultats.	37

Nomenclature

Symbole	Désignation et unité
C_{em}	Couple électromagnétique (Nm)
C_r	Couple résistant (Nm)
d	Diamètre de la conduite de refoulement (m)
E_h	Energie hydraulique (kWh)
E_{pv}	Energie photovoltaïque (kWh)
f	Coefficient de frottement visqueux (Nms)
G	Irradiation (W/m^2)
g	Accélération de la pesanteur ($= 9,81 m/s^2$)
H	Hauteur de pompage (m)
I	Courant débité par la cellule (A)
I_g	Courant débité par le générateur photovoltaïque (A)
I_{ph}	Photocourant (A)
I_s	Courant de saturation (A)
i_s, i_r	Vecteurs des courants de lignes statoriques et rotoriques (A)
J	Inertie des masses tournantes (Nms^2)
k	Constante de Boltzmann
K	Coefficient des pertes de charge singulières
k_{Hi} ($i = 1, 2, 3$)	Paramètres de calcul de la hauteur manométrique totale de la pompe
k_{Ti} ($i = 1, 2, 3$)	Paramètres de calcul du couple de la pompe
L	Longueur de la conduite de refoulement (m)
L_{ss}, L_{rr}	Matrices des inductances statoriques et rotoriques (H)
M_{sr}	Matrices des inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques (H)
n	Vitesse de rotation de l'arbre de la pompe (tr/min)
N_p	Nombre de modules en parallèle
N_s	Nombre de modules en série
P_{hyd}	Puissance hydraulique de la pompe (W)
P_{mec}	Puissance mécanique nécessaire à la pompe (W)
q	Charge de l'électron
Q	Débit d'eau (m^3/s)
Re	Nombre de Reynolds
R_p	Résistance en parallèle (Ω)

Nomenclature

R_s	Résistance en série (Ω)
R_{st}, R_r	Résistances d'une phase statorique et rotorique respectivement (Ω)
S_i ($i = a, b, c$)	Commandes logiques des bras de l'onduleur
T	Température de la cellule (K)
t	Temps (s)
T_0	Température initiale de la cellule (K)
U	Vitesse d'écoulement d'eau dans la conduite (m/s)
V	Tension aux bornes de la cellule (V)
V_g	Tension aux bornes du générateur photovoltaïque (V)
V_i ($i = a, b, c$)	Tensions débitées par l'onduleur (V)
V_s, V_r	Vecteur des tensions simples statoriques et rotoriques (V)
α	Facteur d'idéalité de la diode D
ΔH_L	Pertes de charge linéaires (m)
ΔH_s	Pertes de charge singulières (m)
η	Rendement de la pompe
λ	Coefficient de pertes de charge linéaires
ν	Viscosité cinématique (m^2/s)
ρ	Masse volumique de l'eau (kg/m^3)
Ψ_s, Ψ_r	Flux électromagnétiques statoriques et rotoriques (Wb)
Ω	Vitesse de rotation du moteur (rd/s)

Abréviations

AC	Alternating Current
D	Diode
DC	Direct Current
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PV	PhotoVoltaïque
P&O	Perturb & Observe

Introduction générale

Compte tenu des problèmes environnementaux et de la nécessité de réduire la dépendance aux combustibles fossiles, la transition vers une énergie durable est devenue impérative. Parmi les sources d'énergie alternatives prometteuses, l'énergie solaire se distingue par sa disponibilité abondante et son impact environnemental réduit. Dans cette optique, les systèmes de pompage solaire deviennent une solution clé pour répondre aux besoins croissants en eau, en particulier, dans les zones où l'électricité conventionnelle n'est pas disponible [1].

À cet effet, le principal problème réside dans la nécessité de développer un système capable de s'adapter aux fluctuations naturelles de l'environnement tout en garantissant une efficacité énergétique maximale. Ceci conduit à répondre à une question fondamentale : comment les changements d'ensoleillement et de température affectent-ils l'efficacité des systèmes de production d'énergie solaire et de pompage d'eau, et comment pouvons-nous dégager des solutions capables de relever ces défis ?

Le présent mémoire concerne la modélisation, la simulation et l'optimisation d'un système de pompage solaire. L'analyse des effets d'ensoleillement et de la température sur ses performances comprennent, d'une part, la modélisation des différents éléments qui composent le système de pompage (générateur photovoltaïque, onduleur, groupe motopompe, MPPT, et circuit hydraulique), et, d'autre part, la simulation afin d'obtenir de meilleurs résultats.

Le présent mémoire est organisé principalement en trois chapitres.

✓ Le premier chapitre reporte des généralités sur l'énergie et le pompage solaire, tout en mettant en évidence le rôle fondamental des énergies renouvelables, en particulier, de l'énergie solaire. Le chapitre sera clôturé par évoquer les différentes composantes du système de pompage solaire.

✓ Le second chapitre traite la modélisation des éléments d'un système de pompage solaire ; à savoir : les panneaux photovoltaïques, l'onduleur, le moteur d'entraînement de la pompe, la pompe et le circuit hydraulique ainsi que le contrôleur MPPT. La connaissance de ces éléments est cruciale pour assurer le fonctionnement optimal du système sous des conditions variables d'ensoleillement et de demande d'eau.

✓ Le dernier chapitre sera réservé aux résultats et leur interprétation concernant la simulation du système de pompage solaire cible tout en utilisant deux outils ; à savoir : les logiciels PVsyst et Matlab.

Enfin, le mémoire sera clôturé par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

Généralités sur l'énergie et le pompage solaire

1.1 Introduction

Le premier chapitre de notre investigation est dédié à des généralités sur l'énergie et le pompage solaire. Tout d'abord, nous allons aborder la diversité énergétique, les sortes primaire et secondaire de l'énergie, ses sources renouvelables et non-renouvelables ainsi que ses formes. Aussi, nous allons relater quelques notions relatives aux sources renouvelables telles que l'énergie éolienne, hydraulique, géothermique et bio-massique. Ces sources d'énergie sont devenues cruciales dans notre quête collective pour réduire notre dépendance aux combustibles fossiles et atténuer les impacts sur l'environnement.

Une attention particulière sera réservée à l'énergie solaire qui est une ressource abondante et inépuisable pour un système de pompage solaire. À cet effet, nous allons présenter, d'une part, les différentes façons d'exploiter cette source ; à savoir : l'énergie solaire thermique, l'énergie solaire thermodynamique et l'énergie solaire photovoltaïque, et, d'autre part, ses avantages et ses inconvénients environnementaux. Aussi, il est fondamental de comprendre les éléments liés au système de pompage solaire tels que le rayonnement, l'irradiation, la durée d'ensoleillement, la constante solaire et les conditions météorologiques associées. De plus, nous allons relater les solutions et les intérêts associés à l'adoption d'un système de pompage solaire.

Enfin, nous clôturons le chapitre par évoquer les composantes du système de pompage solaire notamment le panneau photovoltaïque, le moteur, la pompe, etc.

1.2 Diversité énergétique

L'énergie est au cœur de notre vie quotidienne en alimentant nos maisons, nos véhicules, etc. Ces différentes formes d'énergie proviennent de sources différentes et chacune possède des caractéristiques uniques en termes de disponibilité, d'impact environnemental et de durabilité. Les principales sources d'énergie peuvent être divisées en deux catégories : l'énergie primaire et l'énergie secondaire.

L'énergie primaire est une source directe de production d'énergie, généralement, à partir de ressources naturelles. Parmi elles, l'énergie solaire se distingue par l'utilisation du soleil ; tandis que, l'énergie éolienne utilise des éoliennes. L'hydroélectricité et l'énergie géothermique étudient respectivement le mouvement de l'eau et la chaleur interne de la terre pour produire de l'énergie. La biomasse issue de la matière organique est également une source d'énergie importante.

D'un autre côté, l'énergie secondaire est obtenue en convertissant l'énergie primaire en une forme plus utilisable. L'électricité, l'énergie thermique et l'énergie chimique sont des exemples de sources d'énergie secondaires largement utilisées dans la société moderne. L'électricité joue

notamment un rôle de premier plan dans l'alimentation de divers appareils, machines et infrastructures. Aussi, le paysage énergétique mondial est également caractérisé par des sources plus traditionnelles telles que les combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) et l'énergie nucléaire, qui constituent pour certains pays le pilier de l'approvisionnement énergétique. Bien que ces sources soient souvent efficaces, elles posent des défis importants en termes de durabilité environnementale, de dépendance à l'égard de ressources limitées et de risques associés à leur utilisation.

En conséquence, à mesure que la conscience environnementale augmente et que les préoccupations liées au changement climatique s'intensifient, les communautés du monde entier se tournent de plus en plus vers des sources d'énergie plus propres et renouvelables. L'objectif de l'élaboration des technologies et des politiques énergétiques est de conduire la transition vers un avenir énergétique plus durable, en mettant l'accent sur les sources d'énergie respectueuses de l'environnement et en améliorant l'efficacité énergétique. Alors que nous poursuivons la diversification énergétique et l'écologisation, il est essentiel de comprendre les nuances de chaque option afin de construire un avenir énergétique équilibré et plus durable [2]. La figure qui suit illustre les sources et les formes d'énergie. Pour les sources d'énergie, on retrouve les sources renouvelables (soleil, vent, ...) et non-renouvelables (charbon, pétrole, ...). Pour les formes d'énergie, on distingue différentes formes : thermique, électrique, etc. Aussi, l'énergie peut être transférée ou convertie.

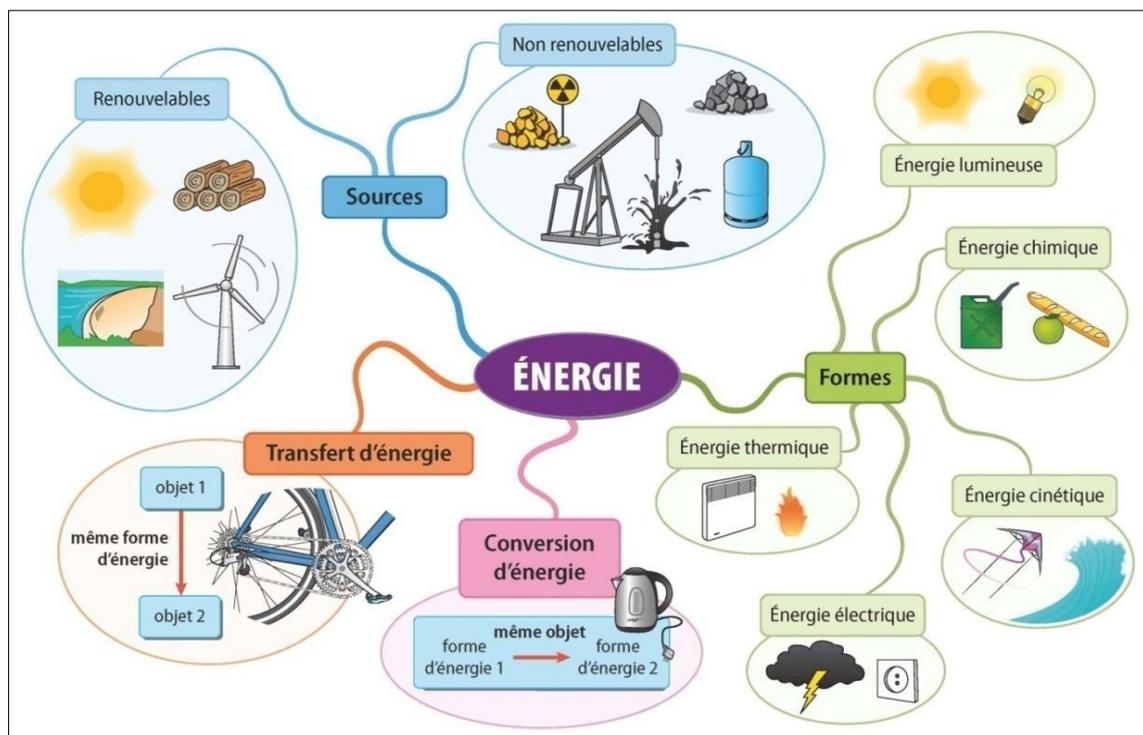


Figure I-1 : Sources et formes de l'énergie [3].

1.3 Energies renouvelables

L'énergie renouvelable est une énergie dérivée de ressources naturelles constamment renouvelées, par opposition aux sources d'énergie non-renouvelables telles que les combustibles fossiles. Elles sont considérées comme plus durables et plus respectueuses de l'environnement car leur utilisation ne contribue pas de manière significative aux émissions de gaz à effet de serre ou à l'épuisement des ressources [4].

Dans ce qui suit, nous allons évoquer quelques sources d'énergie renouvelables.

1.3.1 Énergie éolienne

L'énergie éolienne est exploitée par des éoliennes ou des moulins à vent qui convertissent l'énergie cinétique du vent en électricité. Les parcs éoliens sont installés à terre ou en mer pour profiter des zones venteuses et produire de l'électricité [5].



Figure I-2 : Energie éolienne [6].

1.3.2 Énergie hydraulique

L'électricité produite est également connue sous le nom d'hydroélectricité ; elle est générée en captant l'énergie cinétique de l'eau qui coule. Les barrages hydroélectriques utilisent cette énergie pour faire tourner des turbines afin de produire de l'électricité [7].

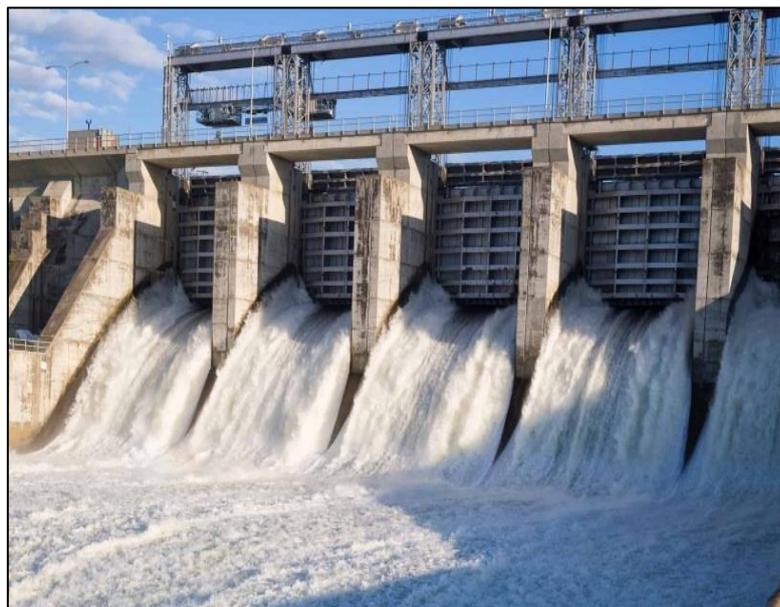


Figure I-3 : Energie hydraulique [8].

1.3.3 Énergie géothermique

L'énergie géothermique utilise la chaleur naturelle du sous-sol. Les centrales géothermiques convertissent l'énergie thermique interne en électricité. Cette source d'énergie est stable et disponible toute l'année avec de multiples applications comme le chauffage géothermique direct [9].



Figure I-4 : Energie géothermique [10].

1.3.4 Énergie bio-massique

La biomasse est obtenue à partir de matières organiques telles que le bois, les déchets agricoles et les résidus forestiers. Elle peut être brûlée pour produire de la chaleur ou transformée en biocarburant et en électricité. Bien que la combustion de la biomasse libère du dioxyde de carbone, elle est considérée comme neutre en carbone car les plantes absorbent le dioxyde de carbone au cours de leur croissance [11].



Figure I-5 : Energie bio-massique [12].

Notons que dans la présente étude, nous nous intéressons au pompage solaire ; à cet effet, une attention particulière sera réservée à l'énergie solaire et plus particulièrement à la filière photovoltaïque.

1.4 Energie solaire

Ce terme fait référence à l'énergie fournie par les rayons du soleil. Ce dernier est la source d'énergie la plus puissante. La technologie dans ce domaine est divisée en technologies actives et passives.

✓ Les technologies actives transforment l'énergie solaire en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement. C'est le cas des cellules photovoltaïques qui transforment la lumière du soleil directement en énergie électrique, des collecteurs solaires qui permettent de chauffer l'eau de maison, des concentrateurs solaires qui utilisent des miroirs pour concentrer les rayons du soleil et générer une chaleur intense transformant ainsi l'eau en vapeur et produisant de l'électricité grâce à certaines machines, et même des fours solaires.

✓ Les technologies passives consistent à bien orienter les bâtiments par rapport au soleil ou à utiliser des matériaux spéciaux et des modèles architecturaux qui permettent d'exploiter l'énergie solaire [13].

1.4.1 Filières d'exploitations de l'énergie solaire

L'évolution de l'énergie solaire a permis le développement de trois filières opérationnelles ; à savoir :

- Pour la chaleur : énergie solaire thermique (capteurs plans).
- Pour l'électricité : énergie solaire thermodynamique (capteurs concentrateurs).
- Pour l'électricité : énergie solaire photovoltaïque (capteurs photovoltaïques).

1.4.1.1. Énergie solaire thermique

L'énergie solaire peut être utilisée pour le chauffage. Les systèmes solaires thermiques captent la chaleur du soleil et la transforment en énergie thermique, soit par des panneaux noirs, soit en concentrant les rayons en un seul endroit pour chauffer un fluide qui sera ensuite utilisé pour générer de la vapeur qui chauffe l'eau ou un fluide caloporteur [14].

Les capteurs solaires sont classés en différentes catégories en fonction de leur conception et de leur fonctionnement. Parmi ces capteurs, on distingue trois types de capteurs solaires thermiques appelés aussi des panneaux solaires ; à savoir : le capteur plan vitré, le capteur plan non vitré, et le capteur à tubes sous vide. Ce dernier est illustré par la figure qui suit.



Figure I-6 : Cas d'énergie solaire thermique [15].

I.4.1.2. Énergie solaire thermodynamique

L'énergie solaire thermodynamique est une technologie qui produit de l'électricité en utilisant la chaleur du soleil. L'énergie solaire thermodynamique utilise la chaleur du soleil pour chauffer un fluide, généralement, de l'eau ou un liquide caloporteur afin de produire de la vapeur. Cette dernière est ensuite utilisée pour alimenter une turbine connectée à un générateur électrique permettant ainsi de produire de l'électricité [16].

Dans le contexte de l'énergie solaire thermodynamique, les capteurs concentrateurs sont souvent utilisés pour produire de l'énergie électrique. Ces capteurs sont des dispositifs qui concentrent la lumière du soleil sur une surface réceptrice. Ils utilisent des miroirs ou des lentilles pour focaliser la lumière solaire sur une zone plus petite, ce qui augmente l'intensité de la lumière incidente.



Figure I-7 : Cas d'énergie solaire thermodynamique [17].

Dans le domaine de la concentration solaire, on trouve plusieurs types de dispositifs pour capturer et focaliser la lumière du soleil. Parmi eux, on retrouve les miroirs paraboliques, les miroirs héliostats, les miroirs plans à concentration linéaire et les réflecteurs Fresnel.

1.4.1.3. Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque.



Figure I-8 : Energie solaire photovoltaïque [18].

Un système solaire photovoltaïque est composé de plusieurs éléments qui contribuent à son fonctionnement ; à savoir [19] :

- La cellule photovoltaïque (ou cellule solaire) est l'unité de base de l'effet photovoltaïque (ou conversion par photopiles) généralement à base de silicium est un matériau semi-conducteur. Ces cellules permettent de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique.
- Un panneau photovoltaïque est formé d'un assemblage de cellules photovoltaïques. Parfois, les panneaux sont aussi appelés modules photovoltaïques. Ils produisent un courant continu lorsqu'elles sont soumises à la lumière du soleil.
- Un onduleur ou un convertisseur pour transformer l'énergie captée par les modules en courant alternatif.
- Les câbles et un dispositif de protection de l'installation en plus un compteur électrique spécial permettant de comptabiliser l'électricité produite.

1.4.2 Avantages et les inconvénients environnementaux de l'énergie solaire

L'énergie solaire, propre et durable, offre une solution cruciale contre le changement climatique en produisant de l'électricité sans émissions de gaz à effet de serre ni de polluants

atmosphériques. Elle favorise l'indépendance énergétique en réduisant la dépendance aux sources non-renouvelables, et elle peut être installée de manière flexible, s'adaptant aux besoins spécifiques à différentes échelles de petits panneaux solaires sur les toits à de vastes installations dans les déserts. De plus, elle encourage une production d'énergie décentralisée réduisant ainsi les pertes d'énergie liées au transport sur de longues distances.

Malgré ces avantages, certains défis subsistent, notamment, la production irrégulière d'énergie solaire en raison des conditions météorologiques et nocturnes. Cependant, les progrès technologiques et les solutions de stockage d'énergie contribuent à atténuer ces limitations renforçant ainsi le rôle central de l'énergie solaire dans le paysage énergétique mondial.

1.5 Système de pompage solaire

1.5.1 Source d'énergie solaire

Le soleil est une étoile de type naine jeune composée de 80% d'hydrogène et 19% d'hélium ; le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments (Fer, Néon, Azote, Silicium, etc.). C'est à l'intérieur que l'on trouve sa partie la plus chaude (le noyau) où la température atteint une valeur très importante. Sa photosphère (sa surface visible) est relativement froide avec une température estimée à 5500 °C [20].

Cette étoile émet un large spectre de radiations électromagnétiques comprenant des photons de différentes longueurs d'onde [21].

1.5.2 Rayonnement solaire

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie d'environ 1367 W/m² en une seconde appelée la constante solaire. Cette énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique émis par le soleil avec une longueur variant de 0,22 à 10 µm.

L'atmosphère absorbe environ 15% du rayonnement solaire et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnements diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie d'environ 6% du rayonnement solaire vers l'espace. Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme des rayonnement direct et diffus. L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc. [22].

Pour le rayonnement direct, les rayons du soleil atteignent le sol sans subir de la modification (sans diffusion par l'atmosphère) et restent parallèles entre eux.

Le rayonnement diffus est un rayonnement solaire diffusé dans toutes les directions après avoir interagi avec les molécules de gaz et les particules de l'atmosphère. Il atteint la surface de la

terre sous forme de lumière indirecte provenant de toutes les directions.

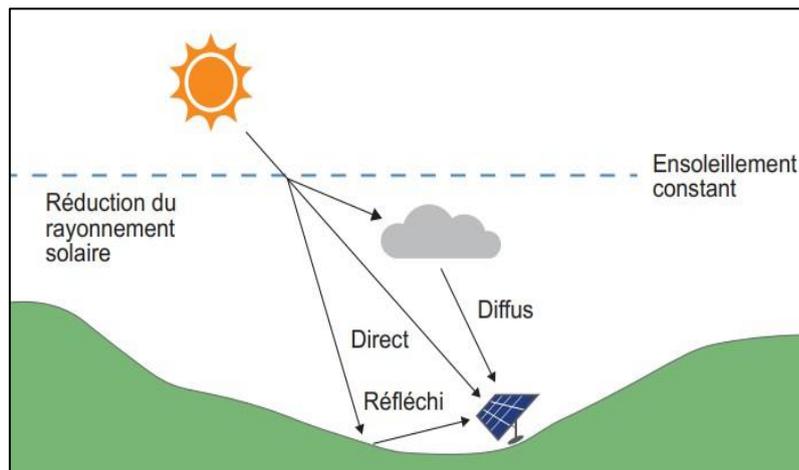


Figure I-9 : Différents rayonnements solaires [23].

Le rayonnement solaire réfléchi est le rayonnement qui atteint la surface terrestre après avoir été réfléchi par des surfaces réfléchissantes telles que l'eau, la neige, la glace, les nuages, ou même des surfaces urbaines comme le béton ou le verre des bâtiments ; le coefficient de réflexion est appelé “albédo” [24].

1.5.3 Gisement et irradiation solaire

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [25]. Il est utilisé dans des domaines variés tels que l'agriculture, la météorologie, la sécurité publique, etc. Les données associées au gisement solaire englobent une diversité de mesures et de paramètres utilisés pour évaluer le potentiel énergétique solaire d'une région spécifique. Parmi ces données, on retrouve :

- ✓ L'irradiation solaire est l'angle que font les rayons du soleil par rapport à une surface détermine la densité d'énergie que reçoit la surface. Le rayonnement solaire atteint la terre sous forme de rayons parallèles, de sorte que les surfaces perpendiculaires à ces rayons absorbent la plus grande densité d'énergie. Et si on incline la surface depuis cette position verticale, son éclairage diminuera. Généralement, elle est mesurée en kilowattheures par mètre carré par jour ($\text{kWh/m}^2/\text{jour}$) ou en Watts par mètre carré (W/m^2).

- ✓ La durée d'ensoleillement est le nombre total d'heures pendant lesquelles la lumière du soleil rayonne sur une zone particulière pendant une période de temps particulière (jour, mois ou année). Cette mesure est importante car elle détermine la disponibilité de l'énergie solaire

dans une région et en raison de son importance dans la compréhension des changements saisonniers de l'exposition au soleil. Elle peut varier considérablement en fonction de la latitude, de la saison, de la météo locale et d'autres facteurs géographiques [26].

✓ La constante solaire est la quantité d'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère terrestre sur une surface unité perpendiculaire au rayonnement solaire. Cette valeur déterminée à partir des mesures réalisées, par exemple, à l'aide de satellites. Elle est en fonction de la distance terre-soleil, et varie quelque peu au cours de l'année. Sa valeur moyenne annuelle est égale à 1353 W/m^2 .

✓ L'ensemble de données météorologiques comprend une variété d'informations concernant les conditions atmosphériques et météorologiques d'une région particulière. Ces informations comprennent généralement des mesures qui affectent le gisement solaire telles que les nuages qui réduisent le rayonnement solaire, la pluie et la neige qui peuvent réduire temporairement l'efficacité des panneaux solaires, et le brouillard et la température qui modifient la quantité d'énergie solaire directe qui atteint la surface de la terre [24].

1.5.4 Solutions énergétiques pour le pompage d'eau

En raison de la transition énergétique mondiale vers des solutions renouvelables, les organisations humanitaires et de développement utilisent de plus en plus la technologie de l'énergie solaire pour leurs projets d'approvisionnement en eau. Un approvisionnement énergétique constant et fiable est crucial pour assurer la prestation de services essentiels, notamment, dans le domaine de l'eau. Dans un grand nombre de projets d'approvisionnement en eau, celle-ci est pompée dans des masses d'eau superficielles ou au moyen de forages, et acheminée dans des réservoirs d'accumulation en hauteur puis dirigée vers des systèmes de distribution par gravité.

Dans certains pays, l'énergie nécessaire au pompage de l'eau est fournie par des générateurs diesel et/ou par des réseaux électriques. Du fait de la profondeur des nappes phréatiques, de l'éloignement des points d'eau et/ou des besoins élevés en eau, le pompage de l'eau nécessite une grande consommation d'énergie qui entraîne des coûts récurrents considérables, en particulier, pour l'approvisionnement en carburant et la maintenance des équipements.

Le pompage solaire de l'eau est la transformation directe de l'énergie solaire en électricité pour alimenter une pompe à eau. Cette technologie est considérée dans un certain nombre de contextes et de régions comme la solution la plus appropriée et la plus rentable afin d'assurer un approvisionnement en eau durable et fiable. L'exploitation et l'entretien de ce système sont beaucoup plus simples et économiques, ce qui permet de réduire ou d'éviter les pénuries d'eau

dues à des pannes d'équipement. En plus, elle est adaptée aux endroits où le réseau électrique est inexistant ou défectueux ainsi qu'aux contextes où l'approvisionnement en carburant et la logistique requise sont trop coûteux.

1.5.5 Intérêts du pompage solaire [27]

- ***Intérêt environnemental du pompage solaire***

Dans le contexte mondial du changement climatique, la réduction des émissions de gaz à effet de serre est devenue extrêmement importante. Les solutions respectueuses de l'environnement telles que l'énergie solaire gagnent du terrain, y compris dans les programmes d'intervention d'urgence et d'aide au développement.

- ***Intérêt économique du pompage solaire***

L'utilisation de sources d'énergie renouvelables augmente en flèche dans le monde entier, cette énergie est l'une des solutions les plus populaires qui a connu une croissance rapide au cours de la dernière décennie. Rien qu'en 2017, plus de 40 000 nouveaux panneaux solaires ont été installés chaque heure sur la planète. Ce déploiement généralisé a permis aux panneaux solaires PV de bénéficier d'une réduction d'environ 80% au cours de la dernière décennie et devrait baisser d'environ 40% en 2027.

- ***Intérêt technologique du pompage solaire***

Les progrès technologiques en matière de pompage solaire permettent de disposer d'un matériel solide, polyvalent et nécessitant peu d'entretien avec peu de pièces mobiles et peu de besoins en maintenance, ce qui réduit les coûts et les efforts de maintenance.

1.5.6 Composantes d'un système de pompage solaire

Un système de pompage d'eau solaire se compose d'une chaîne d'éléments ; à savoir : le panneau photovoltaïque, la pompe à eau et son moteur d'entraînement, le contrôleur MPPT, le convertisseur DC-AC, et autres composants (câblage, réservoir, tuyaux de refoulements, etc.) [28].

- ***Panneau photovoltaïque :***

Un dispositif technologique composée d'un ensemble de cellules solaires interconnectées, généralement assemblées sur un châssis d'aluminium vitré.

Lorsque la lumière du soleil frappe les cellules solaires, les atomes qu'elles contiennent absorbent une partie des photons de la lumière, provoquant une excitation qui libère des électrons. Ces électrons circulent ensuite dans un conducteur pour générer un courant électrique. La quantité est proportionnel à l'intensité du rayonnement incident sur le capteur.

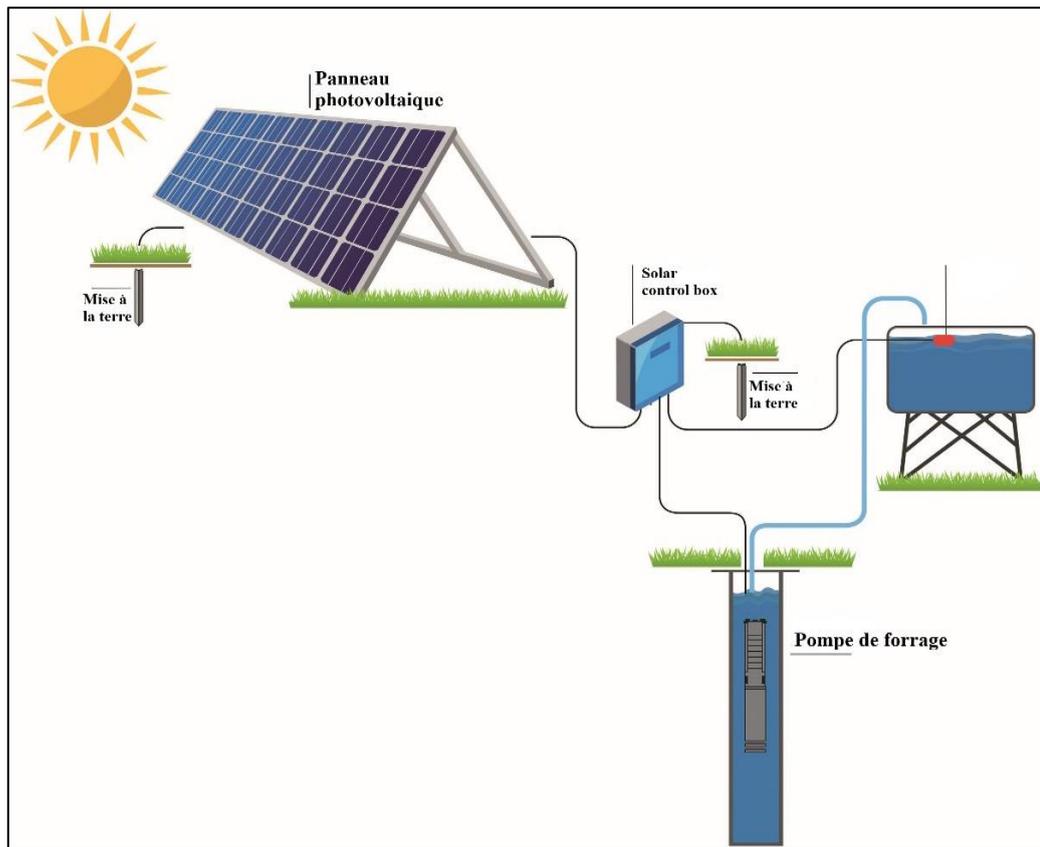


Figure I-10 : Composantes du système de pompage solaire [29].

- **Pompe à eau**

On appelle pompe tout appareil qui aspire un fluide d'une région à basse pression pour le refouler vers une région à plus grande pression.

Les pompes sont calibrées en fonction du débit (m^3/h) et de la hauteur (m), et elles sont reliées à un moteur électrique calibré en kilowatts (kW). Le moteur est alimenté par l'électricité de la source (le générateur solaire photovoltaïque dans ce cas) et fait fonctionner la pompe pour fournir de l'eau. La pompe peut être de type DC ou AC, centrifuge ou à rotor hélicoïdal, de surface ou immergée.

- **Moteur d'entraînement de la pompe**

Le fonctionnement d'une pompe exige un entraînement qui produit sa rotation. Généralement, la plupart des pompes sont conduites par des moteurs électriques. Le choix de l'entraînement de la pompe dépend de plusieurs facteurs tels que le type de la pompe, la gamme de puissance, etc.

En ce qui concerne les systèmes de pompage solaire, les moteurs d'entraînement électriques à vitesse variable sont actuellement le choix le plus répandu. Principalement, on rencontre deux familles de moteurs qui sont actuellement les plus utilisées pour les applications de pompage

photovoltaïque ; à savoir : les moteurs à courant continu, et les moteurs asynchrones. L'utilisation de ces derniers devient de plus en plus courante du fait de la quasi absence d'entretien. Contrairement, les moteurs à courant continu demandent plus d'entretien.

- **Contrôleur MPPT**

Le contrôleur MPPT est un dispositif électronique qui améliore l'efficacité de la production d'énergie solaire en régulant la tension et le courant fournis par les panneaux photovoltaïques afin de maximiser leur puissance de sortie.

- **Convertisseur DC-AC**

L'onduleur fonctionne avec un circuit de génération des signaux PWM commandé par un circuit de régulation et de protection. Ce dernier assure le transfert optimal de puissance du générateur solaire vers le groupe motopompe et protège la pompe contre le fonctionnement à vide lorsqu'il n'y a pas d'eau dans le puits.

- **Autres composants du système**

Les composants du reste du système comprennent les interrupteurs de déconnexion, les boîtes de jonction PV, les structures de montage, les clôtures, le câblage pour connecter les différents éléments matériels, les capteurs pour l'automatisation ou la protection du système, les appareils de mesure pour surveiller les performances et l'état du système, les débitmètres, etc.

1.6 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté des généralités nécessaires à la compréhension d'un système de pompage solaire. Aussi, nous avons présenté les différentes formes d'énergie en nous concentrant, plus particulièrement, sur l'énergie solaire, ses filières d'exploitation ainsi que ses avantages et ses inconvénients environnementaux. Ceci, nous a conduit à aborder les éléments liés à l'énergie solaire tels que le soleil et ses types de rayonnement, le gisement solaire, y compris des notions telles que l'irradiation solaire, la durée d'ensoleillement, la constante solaire et les conditions météorologiques. De plus, nous avons relaté les solutions et intérêts associés à l'adoption d'un système de pompage solaire.

Enfin, nous avons clôturé le chapitre par évoquer les composantes du système de pompage solaire notamment le panneau photovoltaïque, le moteur, le convertisseur, la pompe, etc.

Chapitre II

Modélisation et optimisation du système de pompage solaire

II.1 Introduction

Le présent chapitre se focalise sur une modélisation des différents éléments du système de pompage solaire ; à savoir : les panneaux photovoltaïques, l'onduleur, le moteur d'entraînement de la pompe, la pompe et le circuit hydraulique ainsi que le contrôleur MPPT. La connaissance et la modélisation de ces éléments est cruciale pour assurer le fonctionnement optimal du système de pompage solaire sous des conditions variables d'ensoleillement et de demande d'eau.

Pour notre investigation, il s'agit d'une configuration typique « forage vers réservoir ». Aussi, le présent travail s'intègre dans le cadre des développements déjà effectués par le laboratoire de recherche des Technologies Industrielles ; à cet effet, le groupe motopompe est de type triphasé avec un moteur électrique de type asynchrone alimenté par un onduleur ou un convertisseur triphasé DC-AC.

Nous allons maintenant entamer la description et la modélisation des éléments du système de pompage solaire.

II.2 Panneaux photovoltaïques

II.2.1. Modélisation de la cellule photovoltaïque

Le modèle électrique simple et basique d'une cellule photovoltaïque solaire se compose d'une diode, de deux résistances et d'un générateur de courant [30].

La relation entre la tension (V) et le courant (I) est donnée par la formule suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{q(V+R_s I)}{\alpha k T} \right) - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (\text{II.1})$$

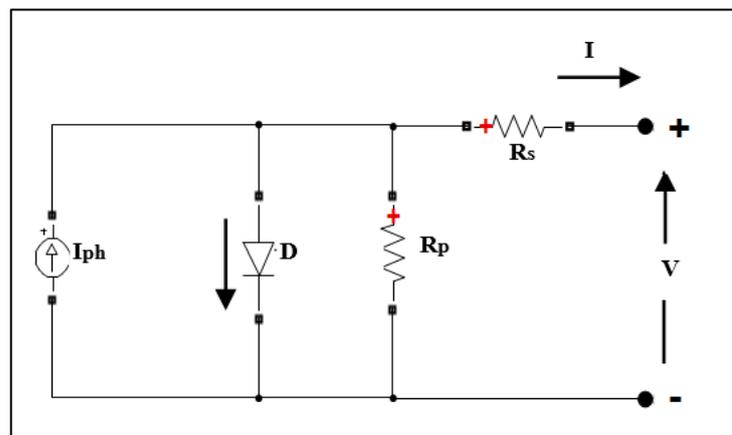


Figure II-1 : Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque [31].

La caractéristique (I-V) est également influencée par la température des cellules. La température des cellules (T) est calculée par une fonction linéaire simplifiée en fonction de la

variable d'ensoleillement ou l'irradiation (G). L'équation qui suit décrit le modèle thermique de la cellule :

$$T = T_0 + k_c \cdot G \quad (\text{II.2})$$

Le paramètre (k_c) est souvent pris égal à 0,03 ; cette dernière valeur se traduit par une augmentation de la température de 30 K pour un flux égal à 1000 W/m².

II.2.2. Modélisation d'un générateur photovoltaïque

Un module photovoltaïque est composé de plusieurs cellules connectées en série ou en parallèle. Les cellules connectées en série augmentent la tension, et les cellules connectées en parallèle augmentent le courant.

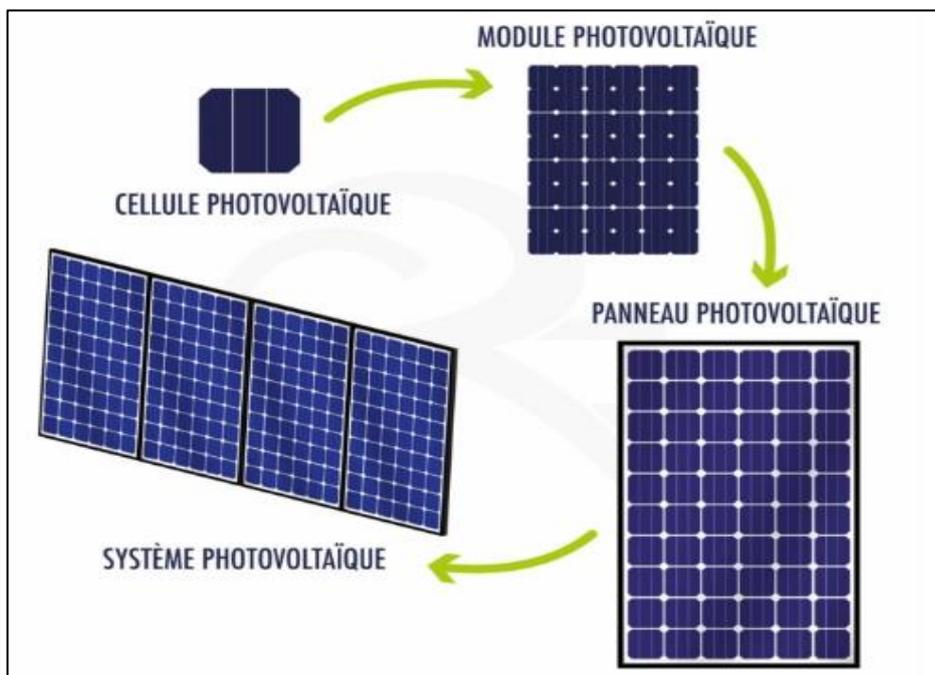


Figure II-2 : Cellule et panneau photovoltaïque [32].

L'association d'un ensemble de modules constitue le panneau photovoltaïque. Et un groupement de panneaux constitue le système ou le générateur photovoltaïque. Pour décrire la caractéristique (I-V) du générateur photovoltaïque qui contient plusieurs panneaux connectés en série et/ou en parallèle, il faut :

$$I_g = N_p \cdot I \quad (\text{II.3})$$

$$V_g = N_s \cdot V \quad (\text{II.4})$$

II.2.3. Influence de l'irradiation et de la température sur la caractéristique I-V

Les caractéristiques électriques du générateur photovoltaïque dépendent de l'irradiation et de la température. Les figures qui suivent montrent, d'une part, l'évolution du courant en

fonction de la tension pour différentes irradiations et une température fixée, et, d'autre part, l'évolution du courant avec la tension pour différentes températures et une irradiation fixée [33].

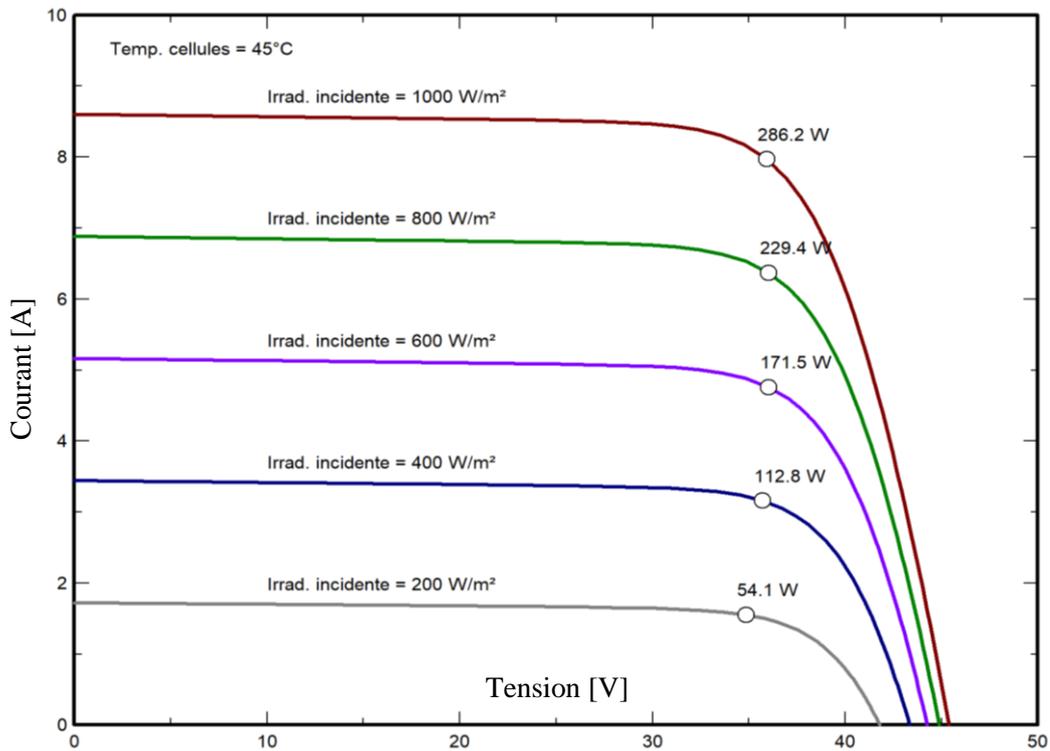


Figure II-3 : Influence de l'irradiation sur la caractéristique I-V pour une température fixée.

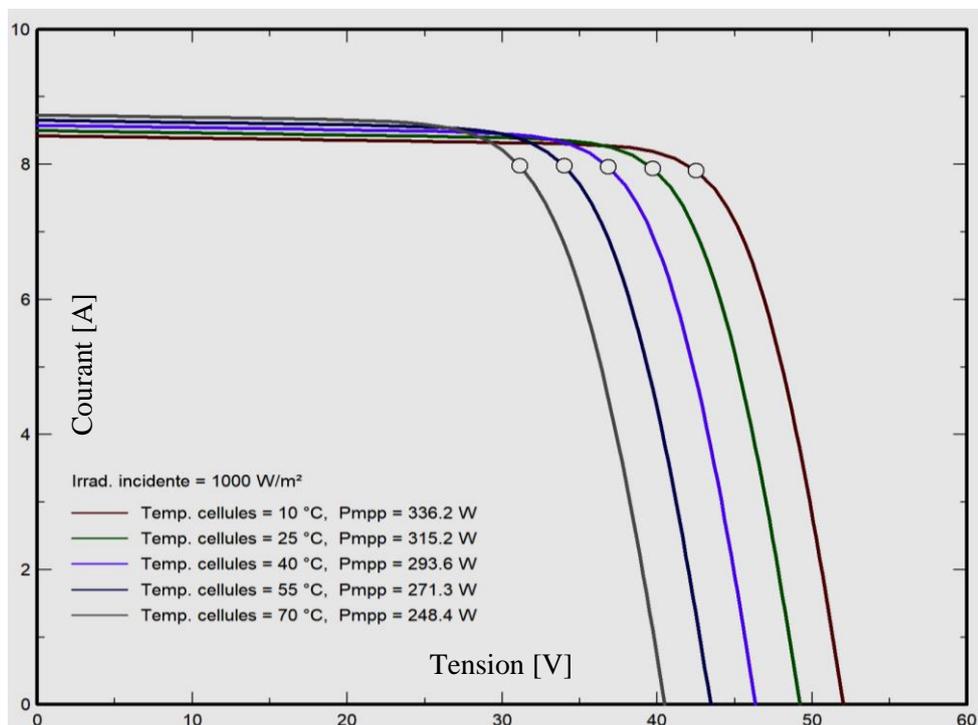


Figure II-4 : Influence de la température sur la caractéristique I-V pour une irradiation fixée.

Le comportement de la caractéristique (I-V) d'un générateur PV en fonction de la température est complexe ; lorsque la température augmente, la tension du générateur diminue et inversement le courant augmente.

Nous allons maintenant procéder à la description du second élément du système de pompage solaire qui est l'onduleur de tension.

II.3 Onduleur de tension

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu produit par un générateur photovoltaïque en courant alternatif monophasé ou triphasé. Pour notre étude, il s'agit d'un onduleur de tension triphasé utilisant le principe de modulation sinus-triangle.

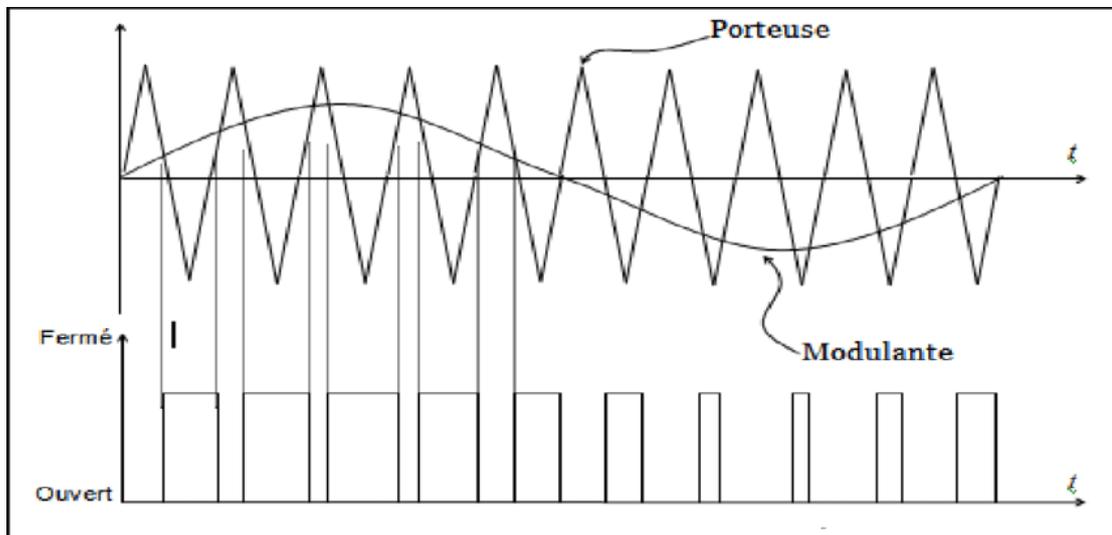


Figure II 5 : Principe de modulation sinus-triangle [34].

Dans la technique "sinus-triangle", les trois tensions de phases sont générées par comparaison des tensions de référence ayant une certaine fréquence à un signal triangulaire commun d'amplitude fixe et de fréquence nettement supérieure [35]. La commutation est effectuée comme suit :

$$S_i \text{ est l'état de l'interrupteur } K_i \text{ tel que : } \begin{cases} S_i = 1 \text{ si } K_i \text{ est fermé} \\ S_i = 0 \text{ si } K_i \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Les commutations des interrupteurs auront lieu quand l'égalité suivante se présente :

$$\text{Tension}_{\text{modulatrice}}(t) = \text{Tension}_{\text{porteuse}}(t) \quad (\text{II.5})$$

Au cours du fonctionnement :

$$\begin{cases} \text{si } (\text{Tension}_{\text{modulatrice}}(t) - \text{Tension}_{\text{porteuse}}(t) > 0) \rightarrow S_i = 1 \\ \text{si } (\text{Tension}_{\text{modulatrice}}(t) - \text{Tension}_{\text{porteuse}}(t) < 0) \rightarrow S_i = 0 \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Après développement, les tensions de sortie peuvent être obtenues comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_g}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Notons que les tensions de sortie de l'onduleur sont fonctions des commandes logiques des bras qui le constituent. Rappelons que ces tensions servent à l'alimentation du moteur d'entraînement de la pompe qui à son tour constitue le troisième maillon de la chaîne de pompage solaire.

II.4 Moteur d'entraînement de la pompe

Principalement, on rencontre deux familles de moteurs qui sont actuellement les plus utilisées pour les applications de pompage solaire : les moteurs à courant continu, et les moteurs asynchrones. En terme de simplicité, les moteurs à courant continu présentent l'option attrayante puisque les panneaux photovoltaïques produisent du courant continu, et donc, nous n'aurons pas besoin d'une stratégie de commande compliquée. Mais leur problème majeur est qu'ils demandent plus d'entretien, ce qui n'est pas du tout recommandé pour le cas des pompes immergées.

En terme de robustesse, il y a eu une croissance rapide d'utilisation des moteurs asynchrones puisqu'ils ont une construction de rotor robuste et ils n'utilisent pas de balais, ce qui minimise le coût d'entretien. Cette construction simple du rotor permet la possession d'un système avec un prix réduit et un rapport puissance/poids plus élevé. Ceci est l'avantage principal des moteurs asynchrones par rapport aux moteurs à courant continu, et c'est l'une des raisons pour lesquelles ce type de moteur est le plus utilisé. Dans des applications de pompage solaire, il est indispensable de disposer d'un onduleur pour commander la vitesse ; ceci apporte aussi un surcoût, mais, globalement l'utilisation d'un onduleur avec un moteur asynchrone conduit pratiquement au même prix qu'avec l'utilisation d'un moteur à courant continu. D'ailleurs, les onduleurs modernes fournissent d'excellentes commandes en vitesse et donc leur coût sera justifié par l'amélioration des performances [35].

Nous allons maintenant relater les équations relatives au moteur asynchrone triphasé ; soit :

- **Pour le stator :**

$$V_s = [R_{st}][i_s] + \frac{d}{dt} [\psi_s] \quad (\text{II.8})$$

- **Pour le rotor :**

$$V_r = 0 = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt} [\psi_r] \quad (\text{II.9})$$

- **Equations électriques :**

Le couplage entre le rotor et le stator intervient dans les équations des flux qui s'écrivent sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Après développement, on obtient le système qui traduit les équations du moteur asynchrone comme suit :

$$\begin{cases} V_s = [R_{st}][i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [i_s] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}][i_r]) \\ V_r = [R_r][i_r] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [i_r] + \frac{d}{dt} ([M_{rs}][i_s]) \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

- **Equations mécaniques :**

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire la variation non seulement des paramètres électriques (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse). À cet effet, l'équation mécanique se traduit par :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d}{dt} \Omega + f\Omega \quad (\text{II.12})$$

Nous allons dans ce qui suit procéder à la description de l'élément pompe.

II.5 Pompe

Pour notre application, le choix d'une pompe immergée s'impose du fait qu'elle permet de puiser l'eau d'un forage ou d'un puits. On dit qu'elle est immergée, car elle est installée directement dans l'eau à puiser. Elle peut être fabriquée en acier inoxydable pour résister aux eaux corrosives ou aux eaux polluées. Son moteur électrique est entièrement étanche. Lorsqu'il se met en route, l'eau entre par le bas de la pompe ; refoulée à la surface, elle peut être directement utilisée [36].

La pompe de forage est conçue pour récupérer de l'eau à une grande profondeur. Avec un diamètre de tuyau nettement plus petit, elle possède un très bon débit. La spécificité de la pompe immergée repose sur son fonctionnement qui ne se fait pas par aspiration mais par refoulement pour faciliter les amorçages difficiles. Installée en profondeur, elle ne provoque pas de nuisance sonore et ne craint pas le gel. Lorsque l'eau remonte, elle circule le long du moteur et le refroidit. La pompe immergée présente un inconvénient majeur lié à l'incapacité de fonctionner à sec. Il faut toujours que la pompe soit dans l'eau.

En usage domestique, les pompes immergées sont installées le plus souvent pour approvisionner le réseau d'eau d'une maison, par exemple pour alimenter des sanitaires, une machine à laver ou elles sont utilisées pour l'arrosage. Elles sont aussi idéales pour une exploitation agricole.

Généralement, le fonctionnement d'une pompe met en jeu trois paramètres : la hauteur manométrique, le débit et la vitesse de rotation. La hauteur de pompage est la somme de la

hauteur statique, la hauteur dynamique, l'altitude d'injection au réservoir et les pertes de charge qui en résultent. La puissance hydraulique de la pompe est exprimée par l'équation suivante :

$$P_{hyd} = \rho g \cdot HMT \cdot Q \quad (II.14)$$

Habituellement, deux caractéristiques principales sont fournies par le constructeur ; à savoir : la caractéristique Hauteur/Débit et la caractéristique Rendement/Débit.

II.5.1. Caractéristique Hauteur/Débit :

L'énergie que fournit la pompe au liquide se présente sous deux formes une énergie de pression qui correspond à l'augmentation de pression dans la pompe et une énergie cinétique qui correspond à l'augmentation de vitesse du liquide entre l'aspiration et le refoulement. La courbe représentant la variation de la hauteur en fonction du débit s'appelle la caractéristique "hauteur d'élévation" $H(Q)$ de la pompe. Elle est établie par un essai de la pompe sur un banc d'essai, elle est fournie par le fabricant.

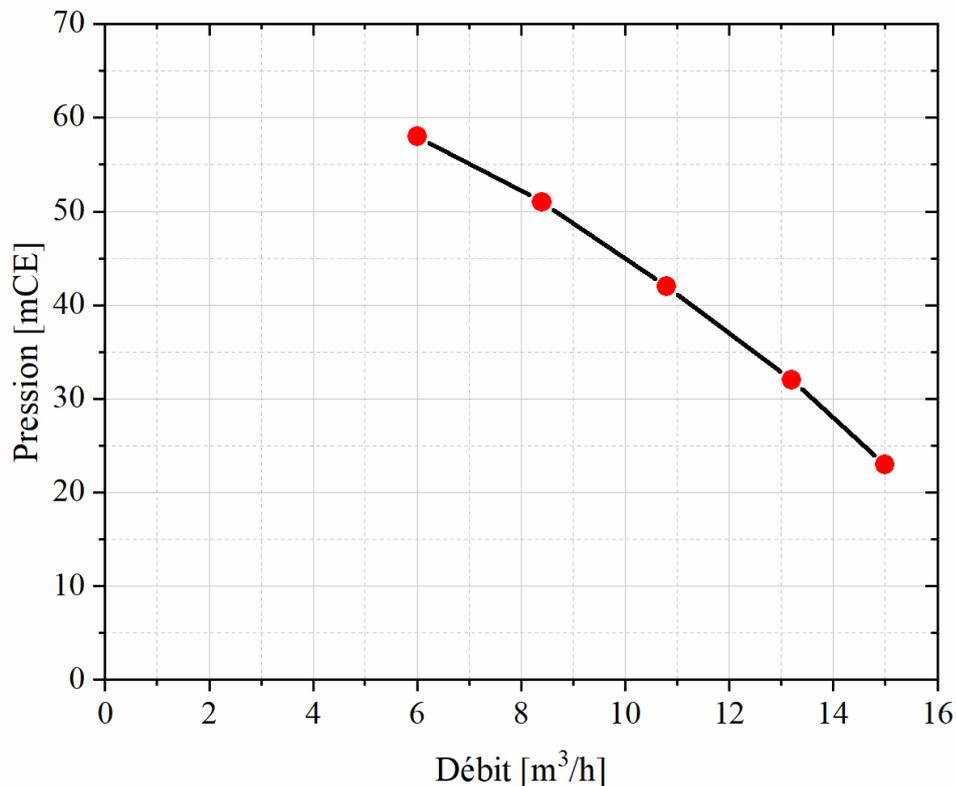


Figure II-6 : Caractéristique typique $H(Q)$ de la pompe pour une vitesse fixée [33].

L'équation qui relie la hauteur au débit de la pompe, pour une vitesse fixée, peut être exprimée par [35] :

$$H = k_{h3} \cdot Q^2 + k_{h2} \cdot Q + k_{h1} \quad (II.15)$$

Pour une prise en charge de la variation de la vitesse de rotation de la pompe en plus de la variation du débit, on peut écrire :

$$H = k_{H3} \cdot Q^2 + k_{H2} \cdot n \cdot Q + k_{H1} \cdot n^2 \quad (\text{II.16})$$

II.5.2. Caractéristique Rendement/Débit :

Le rendement de la pompe est mesuré par le rapport entre la puissance hydraulique (reçue par le liquide) et la puissance mécanique fournie à la pompe. Ce rendement varie en fonction du débit et est représenté par une courbe fournie par le fabricant.

Le rendement permet de déterminer la puissance absorbée par l'arbre, compte tenu de la puissance hydraulique. La puissance sur l'arbre est une caractéristique de la pompe qui permet de déterminer le moteur d'entraînement. La puissance du moteur nécessaire pour entraîner la partie hydraulique est toujours supérieure à la puissance mécanique absorbée par l'arbre compte tenu des différentes pertes dues à la transmission, aux pertes générées au niveau de la pompe et au couple de démarrage. Le meilleur rendement de la pompe détermine le débit nominal qui correspond à la hauteur de chute nominale ou à la puissance nominale.

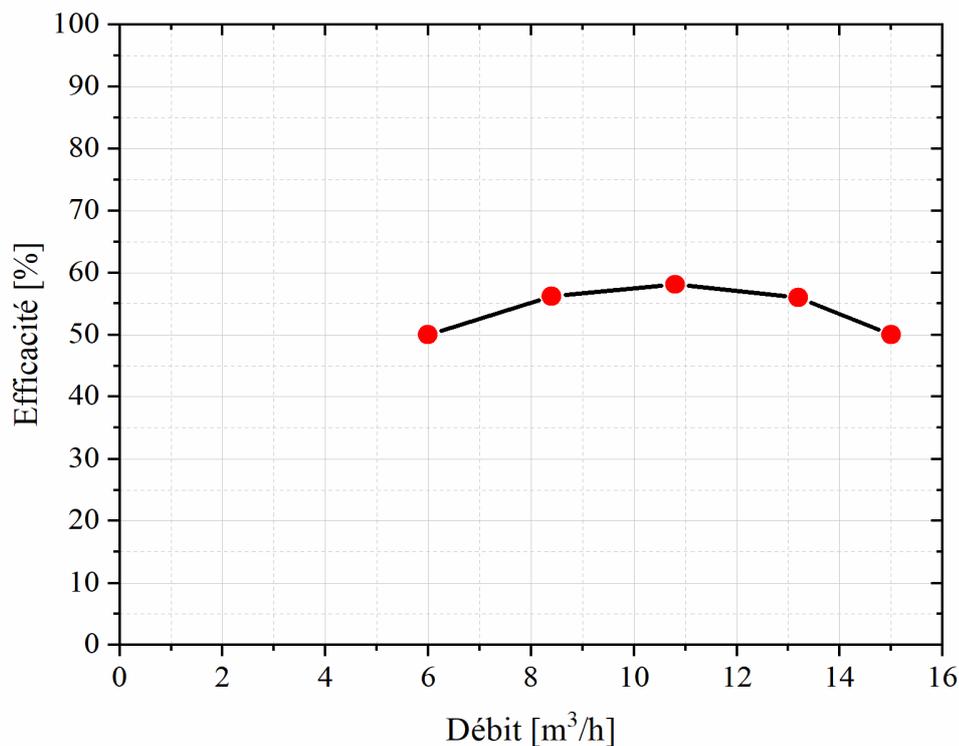


Figure II-7 : Caractéristique typique $\eta(Q)$ de la pompe pour une vitesse fixée [33].

Le rendement de la pompe est donné par l'expression qui suit :

$$\eta = \frac{P_{hyd}}{P_{mec}} \quad (\text{II.17})$$

À noter que la puissance mécanique est celle qui est délivrée par le moteur d'entraînement de la pompe.

II.5.3. Caractéristique Couple/Débit :

L'équation du couple développé par la pompe aura la forme suivante [35] :

$$C_r = k_{t1} \cdot n^2 + k_{t2} \cdot n + k_{t3} \quad (\text{II.18})$$

Pour une prise en charge de la variation du débit de la pompe en plus de la variation de vitesse, on peut écrire :

$$C_r = k_{T1} \cdot n^2 + k_{T2} \cdot n \cdot Q + k_{T3} \cdot Q^2 \quad (\text{II.19})$$

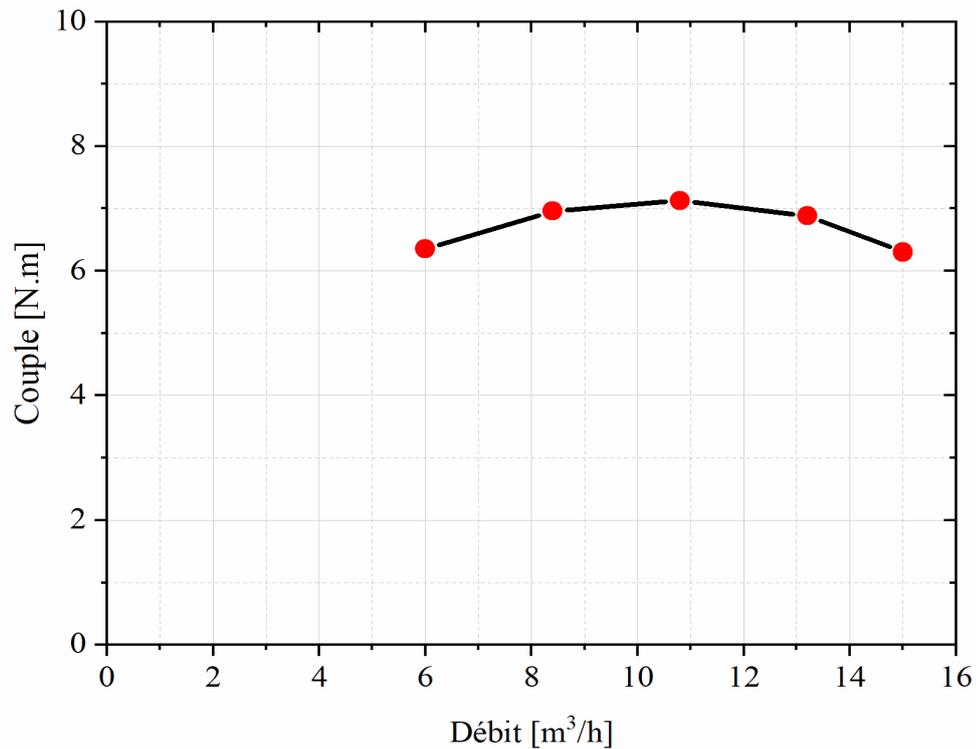


Figure II-8 : Caractéristique typique $C_r(Q)$ de la pompe pour une vitesse fixée.

Nous allons maintenant aborder les pertes de charge liées au circuit hydraulique.

II.6 Pertes de charge dans le circuit hydraulique

Les systèmes de pompage solaire subissent des pertes d'énergie en raison de la résistance au passage de l'eau à travers les tuyaux, les raccords et autres composants du circuit hydraulique.

Il est essentiel de tenir compte de ces pertes lors de la conception du système afin de garantir que la pompe puisse les surmonter et fournir le débit et la pression requis. On distingue deux types de pertes de charge : linéaires et singulières.

II.6.1. Pertes de charge linéaires

Elles sont produites par le frottement du fluide sur les parois de conduites, et peuvent être

exprimées par la formule suivante :

$$\Delta H_L = \frac{\lambda \cdot U^2}{2 \cdot g \cdot d} \cdot L \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$$U = \frac{4 \cdot Q}{\pi d^2} \quad (\text{II.21})$$

On constate que ces pertes de charge sont directement proportionnelles à la longueur de la canalisation. À noter que le coefficient de pertes de charge (λ) dépend aussi de la nature du régime d'écoulement. Ce dernier est déterminée par la connaissance de la valeur du nombre de Reynolds qui peut être caractérisé sous trois formes :

- **Régime laminaire** : un nombre de Reynolds inférieur à 2000 indique que l'écoulement est calme et régulier.
- **Régime turbulent** : un nombre de Reynolds supérieur à 4000 indique que l'écoulement est sous forme de tourbillons.
- **Zone critique** : un nombre de Reynolds situé entre 2000 et 4000 implique que l'écoulement est instable entre les régimes laminaire et turbulent.

Notons que le nombre de Reynolds est adimensionnel et il combine trois caractéristiques importantes de l'écoulement du fluide : la vitesse, la viscosité, et le diamètre (conduite cylindrique) ; ce nombre est exprimé par :

$$R_e = \frac{U \cdot d}{\nu} \quad (\text{II.22})$$

En régime laminaire, la nature ou l'état de la surface des parois intérieures des canalisations n'intervient pas dans le calcul de la perte de charge. Le coefficient de perte de charge est :

$$\lambda = \frac{64}{R_e} \quad (\text{II.23})$$

En régime turbulent, le facteur de frottement est traduit par la formule de Colebrook ; soit :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{2,51}{R_e} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda}} + \frac{1}{3,7} \cdot \frac{\varepsilon}{d} \right) \quad (\text{II.24})$$

On constate que cette formule est sous forme implicite ; par conséquent, la recherche de (λ) ne peut se faire que par un calcul itératif. Dans ce cas, la perte de charge est fonction de l'état de surface du matériau de la canalisation.

Dans la zone critique c'est à dire un nombre de Reynolds situé entre 2000 et 4000, la formule employée sera celle qui correspond à la situation d'un régime d'écoulement turbulent.

II.6.2. Perte de charge singulières :

Elles sont produites par tout phénomène local tel que changement de section ou de direction dans la conduite, vanne, clapet, etc. Les pertes de charge singulières sont exprimées

par la formule suivante :

$$\Delta H_s = K \frac{U^2}{2g} \quad (\text{II.25})$$

Nous allons maintenant aborder les éléments liés au fonctionnement optimal du système de pompage solaire. Cet objectif vise à faire travailler le générateur photovoltaïque au Point de Puissance Maximale.

II.7 Optimisation du système de pompage solaire

Nous allons maintenant traiter le suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque. La puissance électrique produite par un panneau photovoltaïque dépend fortement de l'ensoleillement et à un degré moins important de la température des cellules. Ces deux variables influençant le comportement du système présentant des fluctuations quotidiennes et saisonnières.

La figure qui suit montre le MPP sur la caractéristique I-V pour différentes irradiations à une température fixée.

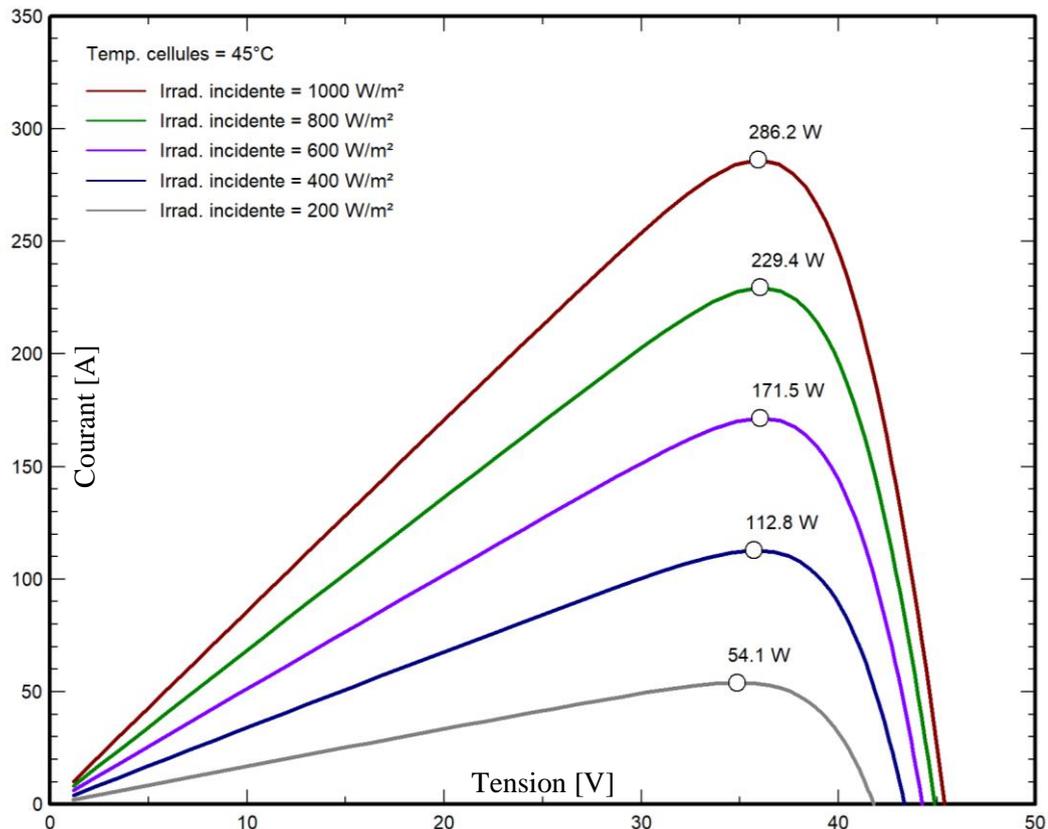


Figure II-9 : Variation du MPP avec l'ensoleillement pour une température fixée [33].

La figure qui suit montre le MPP sur la caractéristique I-V pour différentes températures avec une irradiation fixée.

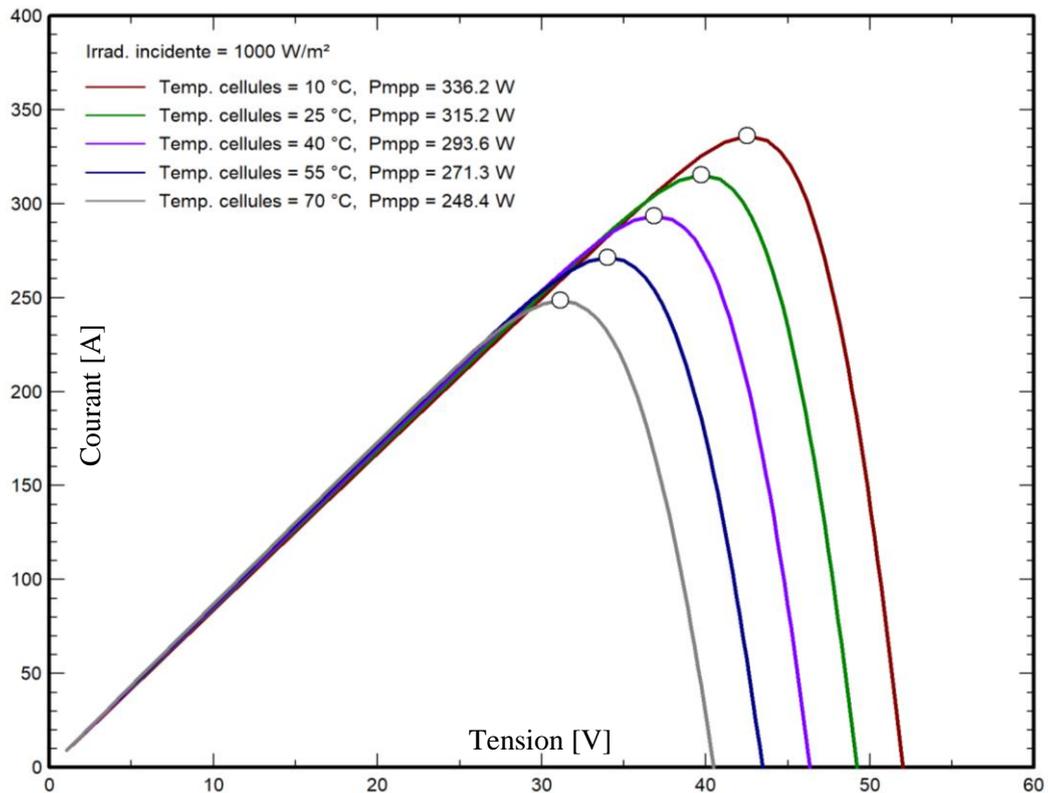


Figure II-10 : Variation du MPP avec la température pour une irradiation fixée [33].

Pour ces raisons, le panneau photovoltaïque ne peut fournir une puissance maximale que pour une tension particulière et un courant bien déterminé ; ce fonctionnement à puissance maximale dépend de la charge à ses bornes. À cet effet et en fonction du type de cette charge, un dispositif de contrôle devra être intégré dans le circuit de commande de l'onduleur. Ce dernier doit être capable de faire fonctionner le panneau photovoltaïque à sa puissance maximale [35].

Notons que la méthode de suivi ou "Tracking" connue sous le nom MPPT (Maximum Power Point Tracking) est basée sur l'utilisation d'un algorithme de recherche où le maximum de la courbe de puissance est estimé sans interrompre le fonctionnement normal du panneau photovoltaïque.

II.7.1. Point de fonctionnement

Un panneau photovoltaïque sous un ensoleillement constant et uniforme a une caractéristique I-V de telle sorte que pour chaque ensoleillement il n'y a qu'un seul point de fonctionnement qu'on l'appelle le point de puissance maximale (MPP : Maximum Power Point). Pour ce dernier, le panneau fonctionne au rendement maximal et produit sa puissance maximale.

Quand on lie une charge directement à un panneau photovoltaïque, ce point de fonctionnement n'est pas forcément le MPP mais il sera l'intersection de la caractéristique I-V avec la ligne de

charge. Pour surmonter ce problème, le tracking de la puissance maximale peut être utilisé pour maintenir le fonctionnement du panneau photovoltaïque à sa puissance maximale. Le MPPT fait ceci en contrôlant la tension ou le courant du générateur indépendamment de celle de la charge. Cette situation est relatée par le schéma de la figure qui suit.

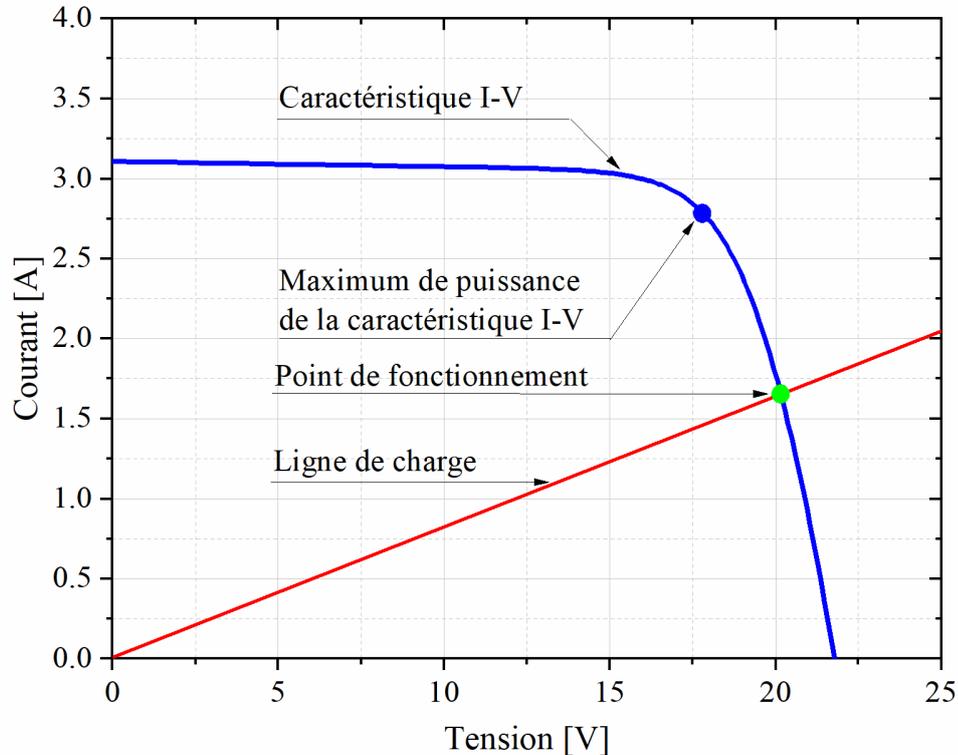


Figure II-11 : Fonctionnement d'un panneau photovoltaïque.

L'emplacement du MPP dans la caractéristique I-V du panneau photovoltaïque n'est pas connu a priori. Cependant, en fonction de l'intelligence de l'algorithme de tracking, le MPP peut être localisé et suivi soit par des calculs de modèle ou par un algorithme de recherche. La situation est encore plus compliquée du fait que le MPP dépend d'une manière non linéaire de l'ensoleillement et de la température.

II.7.2. Quelques types d'algorithmes de tracking

Plusieurs algorithmes de tracking ont été proposés par les chercheurs [35]. L'algorithme "Perturber et Observer" (P&O : Perturb-and-Observe) est bien connu et il continue à être la méthode la plus employée dans les modules MPPT commerciaux vu son rendement. Cependant, il n'y a aucun consensus à la base duquel l'algorithme est choisi comme étant le meilleur. Différentes méthodes de tracking existent parmi lesquelles nous relatons les algorithmes :

- Perturber et observer (P&O : Perturb-and-Observe) ;
- Tension constante (CV : Constant Voltage) ;

- Accroissement de la conductibilité (INC : INcremental Conductance) ;
- Capacité parasite (PC : Parasitic Capacitance).

Pour notre investigation, l'algorithme "Perturber et Observer" a été retenu. Pour cette méthode on considère que le panneau photovoltaïque fonctionne à un point qui n'est pas forcément le MPP ; on perturbe la tension de fonctionnement avec (ΔV) et on observe la variation (ΔP) de la puissance électrique. Si (ΔP) est positif, alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP.

D'autres perturbations successives de la tension dans la même direction (c'est-à-dire avec le même signe algébrique) devraient déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP. Dans le cas où (ΔP) est négatif, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP, et donc le signe algébrique de la perturbation de la tension devrait être inversé pour déplacer de nouveau le point de fonctionnement vers le MPP.

L'algorithme "P&O" a des limitations qui réduisent son efficacité. Quand l'intensité de lumière solaire diminue, il est difficile au MPPT de discerner l'emplacement du MPP. Un autre inconvénient de l'algorithme "P&O" est qu'il ne peut pas déterminer quand il a atteint vraiment le MPP. À ce moment, il oscille autour du MPP, en changeant le signe de la perturbation (ΔV) après chaque mesure de (ΔP). En outre, il a été montré que l'algorithme "P&O" peut avoir un comportement erratique sous un changement rapide du niveau de l'ensoleillement.

Sur le schéma de la figure qui suit, nous considérons que le point de fonctionnement est sur la courbe 1. Le MPPT oscille autour du MPP du point B vers le point A, puis vers le point C et vice-versa.

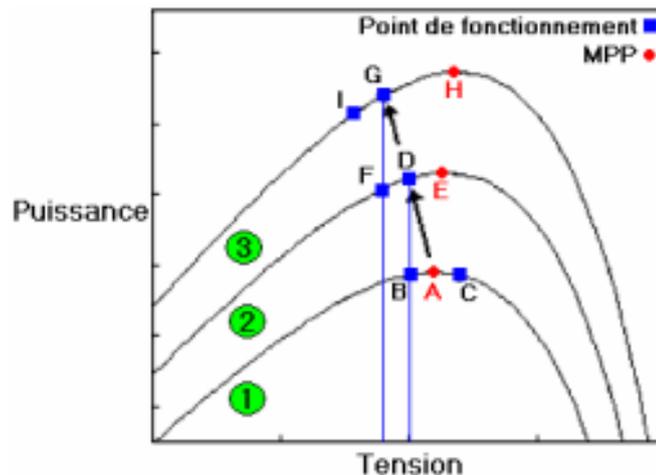


Figure II-12 : Illustration du fonctionnement de l'algorithme "P&O" [35].

Puis, nous supposons que la valeur de l'ensoleillement augmente et la courbe puissance-tension du panneau se déplace vers la courbe 2. Si, au cours du changement rapide de l'ensoleillement

et de la puissance de sortie, le MPPT perturbe le point de fonctionnement du point A vers le point B, le MPPT déplace en réalité le point de fonctionnement de A vers D (puisque le point D et B ont la même tension). Donc, ceci conduit à un (ΔP) positif et le MPPT continuera de perturber la tension dans la même direction ; donc, vers le point F. Si l'ensoleillement augmente toujours rapidement, le point de fonctionnement se déplace vers le point G sur la courbe 3 au lieu du point F sur la courbe 2. Alors, le MPPT voit toujours un (ΔP) positif et il déplace le point de fonctionnement vers le point I tandis qu'il croit en bon sens de convergence vers le MPP.

À partir des points $A \rightarrow D \rightarrow G \rightarrow I$, le MPPT s'éloigne continuellement du MPP en diminuant l'efficacité de l'algorithme "P&O". Cette situation peut se produire lors des jours partiellement nuageux quand le tracking du MPP est plus difficile à cause de son déplacement.

II.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une modélisation mathématique de chaque élément constituant le système de pompage solaire ; à savoir : le panneau photovoltaïque, l'onduleur de tension, le moteur asynchrone, la pompe immergée et le circuit hydraulique ainsi que le contrôleur MPPT. Pour le panneau photovoltaïque, nous avons relaté le modèle simple et basique en une seule exponentielle. Ensuite, nous avons décrit brièvement le modèle de l'onduleur de tension tout en considérant que ses composants sont parfaits et que la commutation de ses bras se fait d'une manière instantanée. Puis, nous avons reporté les équations d'un moteur asynchrone. Pour la partie hydraulique, nous avons évoqué les modèles caractérisant le fonctionnement d'une pompe tout en tenant compte du régime d'écoulement et des pertes de charge. Enfin, le chapitre est clôturé par une vision d'optimisation de fonctionnement du système de pompage solaire qui consiste principalement à atteindre le point de puissance maximale du générateur photovoltaïque.

Chapitre III

Simulation du système de pompage solaire

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons examiner les performances d'un système de pompage solaire autonome en utilisant deux outils de simulation ; à savoir : les logiciels PVsyst et Matlab. Le PVsyst permet de guider l'utilisateur à définir le choix des éléments du système de pompage solaire tels que le groupe motopompe et le panneau photovoltaïque, et de réaliser la simulation sous des conditions météorologiques correspondantes au site cible ; tandis que, le logiciel Matlab permet une simulation dynamique du système de pompage solaire. Cette double approche, nous permet de comparer et de valider les résultats.

III.2 Présentation du projet

Le projet vise à installer un système de pompage solaire pour l'irrigation d'un site agricole isolé nécessitant une gestion efficace et durable de l'approvisionnement en eau. Le site cible se caractérise par un climat semi-aride avec des étés chauds et secs, ce qui favorise l'utilisation d'un système de pompage solaire en raison de l'abondance d'ensoleillement, en particulier, durant la saison d'été. Les principaux objectifs de notre projet sont les suivants :

- Assurer l'approvisionnement en eau tout au long de l'année : Notre système doit fournir de manière autonome et fiable l'eau nécessaire pour l'irrigation, indépendamment des variations saisonnières.
- Mettre en place un système durable : L'utilisation de l'énergie solaire pour le pompage de l'eau vise à promouvoir une agriculture respectueuse de l'environnement en réduisant la dépendance aux sources d'énergie non renouvelables.

La figure qui suit illustre une installation typique d'un système de pompage solaire.

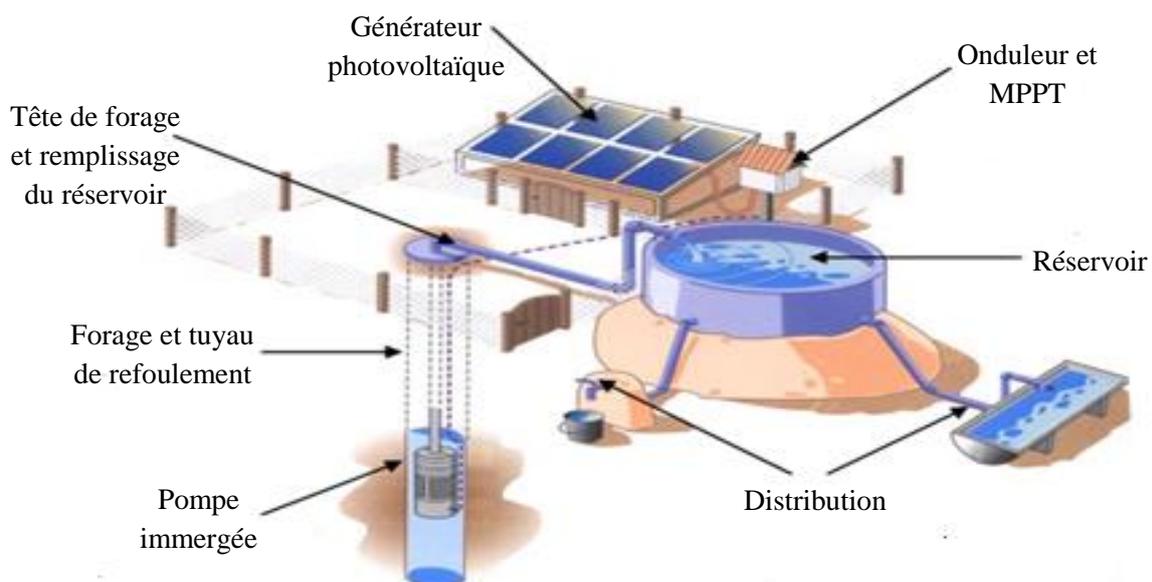


Figure III-1 : Schéma d'un système de pompage solaire.

III.3 Caractéristiques et pré-dimensionnement du système de pompage solaire

III.3.1 Caractéristiques du site cible

Le site d'installation du système de pompage solaire est situé à Aïn Guesma (Wilaya de Tiaret) présentant les coordonnées : 35.29° N, 1.33° E, avec une altitude de 930 mètres.



Figure III-2 : Localisation du site.

III.3.2 Caractéristiques du forage

Un forage se caractérise principalement par une hauteur statique, un rabattement ou une hauteur dynamique, un débit et une profondeur. Pour un forage autorisé et réglementé, les services de la Direction d'Hydraulique de chaque Wilaya dispose de ces données.

Le forage cible a une hauteur statique de 20 m, indiquant la profondeur à laquelle l'eau se stabilise naturellement sans pompage. Il présente un niveau dynamique minimum de 40 m ; soit, un rabattement de 1,67 m/(m³/h) reflétant la baisse du niveau d'eau par mètre cube d'eau pompée. C'est un paramètre essentiel pour évaluer l'impact du pompage sur la nappe phréatique et assurer la pérennité de la ressource en eau. Avec un diamètre de 30 cm, le forage offre un espace adéquat pour l'installation et le fonctionnement de la pompe immergée.

III.3.3 Besoins en eau et réservoir de stockage

Le réservoir doit présenter les caractéristiques techniques idéales pour répondre aux exigences de stockage et de distribution de l'eau. Les besoins en eau pour l'irrigation varient selon les saisons, reflétant les exigences spécifiques des plantations au cours de l'année.

Pour notre cas, nous considérons une quantité moyenne annuelle de 60 m³/jour qui permet d'irriguer, par exemple, une superficie d'un hectare contenant en moyenne 256 oliviers avec des goutteurs de 8 l/h et d'autre plantations ; la durée d'irrigation s'étend à 5 h/jour. Donc, le

débit maximum d'eau journalier sera de 12 m³/h.

Le réservoir est supposé ayant une hauteur de 2,5 m, et il est surélevé du niveau terre à une hauteur de 2,5 m permettant ainsi une distribution efficace de l'eau par effet gravitationnel. Aussi, nous considérons une alimentation par le haut ; d'où une altitude d'injection de 5 m.

III.3.4 Caractéristiques du circuit hydraulique

Le circuit hydraulique est conçu pour assurer une distribution optimale de l'eau avec des caractéristiques techniques bien définies. Le tuyau de refoulement est en polyéthylène (PE) offrant une résistance élevée à la pression et à la corrosion, et assurant ainsi une durabilité accrue.

La longueur totale du tuyau permet une couverture suffisante pour le refoulement de l'eau jusqu'au point d'injection. Sa longueur est liée au niveau d'immersion de la pompe dans le forage. La profondeur minimale de pompage correspond au niveau dynamique minimum plus (5 m) pour éviter tout risque de désamorçage ; soit 45 m pour notre cas. De ce fait la longueur minimale du tuyau est égale à la somme de la profondeur minimale plus l'altitude d'injection ; soit : 50 m. Nous supposons que le réservoir se trouve à une distance de 10 m de la tête du forage, la longueur du tuyau sera de $L = 60$ m. Cette longueur plus le diamètre du tuyau et les éléments de singularités (coudes) seront utilisés pour le calcul des pertes de charge. Nous considérons un diamètre a priori de 50 mm qui permet d'assurer un débit adapté aux besoins quotidiens tout en limitant les pertes de charge et en maintenant une pression optimale dans l'ensemble du circuit.

Nous allons maintenant aborder la simulation du système de pompage solaire sous le logiciel PVsyst.

III.4 Simulation du système de pompage solaire sous PVsyst

Le logiciel PVsyst est conçu pour être utilisé par les architectes, les ingénieurs et les chercheurs, mais c'est aussi un outil pédagogique très utile. Il inclut une aide contextuelle approfondie, qui explique en détail la procédure et les modèles utilisés et offre une approche ergonomique avec guide dans le développement d'un projet. PVsyst permet d'importer des données météo d'une dizaine de sources différentes ainsi que des données personnelles. PVsyst présente les résultats dans un rapport complet, des graphiques et des tableaux spécifiques. Ces données peuvent être exportées vers d'autres logiciels.

III.4.1 Données et besoins d'eau

- Les données climatiques ont été extraites de la base de données intégrée dans PVsyst,

couvrant les rayonnements solaires, les températures ambiantes et les vitesses de vent.

- Les équations utilisées pour définir les besoins d'eau annuels sont les suivantes :

- **Besoin d'eau annuel :**

$$\text{Besoin d'eau annuel} = 60 \times 365 = 21900 \text{ m}^3/\text{an}$$

- **Calcul de l'énergie hydraulique minimale :**

$$E_h = \text{Besoin d'eau annuel} \times \text{Pression minimale} \times \frac{1}{36}$$

$$= 21900 \times \frac{25 \times 1000 \times 9,81}{10^5} \times \frac{1}{36} = 1492 \text{ kWh}$$

Notons que la pression minimale requise est de 25 mCE qui correspond à la superposition de la hauteur statique et de l'altitude d'injection.

- **Calcul de l'énergie PV minimale :**

Pour un rendement du générateur photovoltaïque estimé à 30%, on calcule l'énergie PV comme suit :

$$E_{PV} = \frac{E_h}{\eta_{PV}} = \frac{1492}{0,30} = 4973,33 \text{ kWh} \approx 5000 \text{ kWh}$$

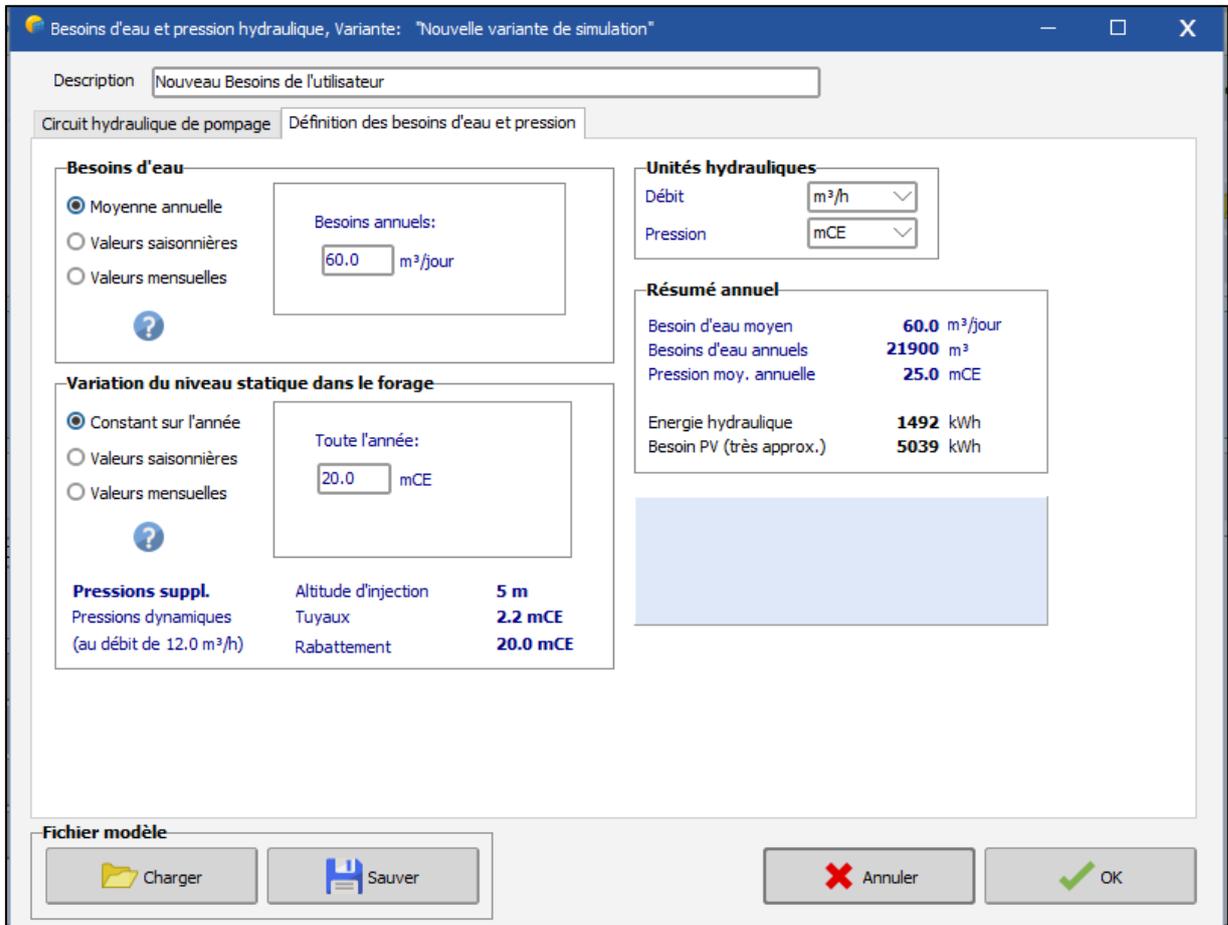


Figure III-3 : Définition des besoins d'eau et résumé annuel.

III.4.2 Détermination des pressions

Nous avons évoqué ci-dessus que la pression minimale requise est de 25 mCE qui correspond à la superposition de la hauteur statique et de l'altitude d'injection.

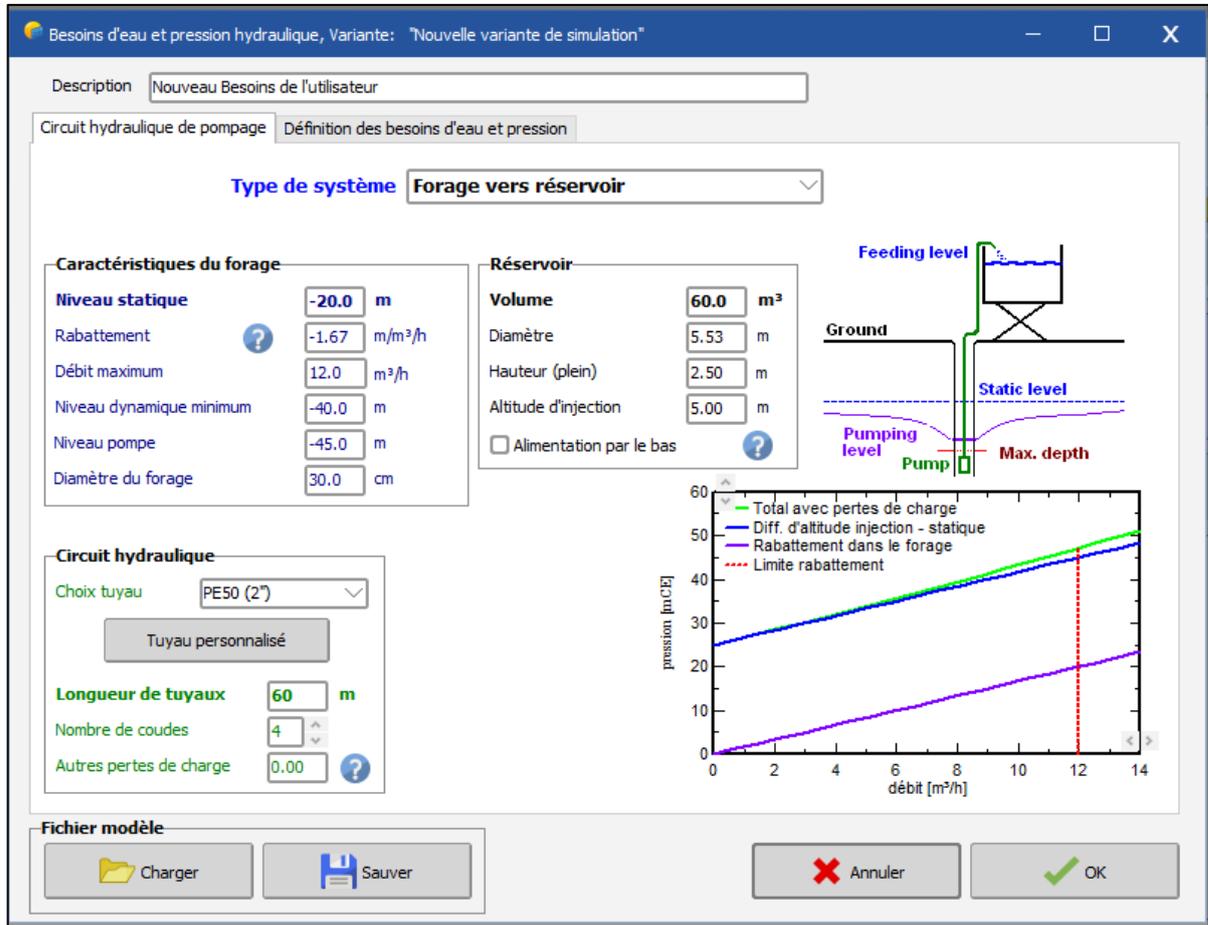


Figure III-4 : Détermination des pressions.

Pour un débit d'eau pompée de 12 m³/h ; la pression sera de 47,2 mCE. Cette dernière intègre la hauteur statique, l'altitude d'injection, l'effet du rabattement et les pertes de charges linéaires et singulières qui sont calculées, pour un débit de 12 m³/h, comme suit :

$$\Delta H_L = \frac{\lambda \cdot U^2}{2 \cdot g \cdot d} \cdot L = \frac{0,012 \times 1,696^2}{2 \times 9,81 \times 0,05} \times 60 = 2,111 \text{ mCE}$$

Avec la vitesse de l'eau :

$$U = \frac{4 Q}{\pi d^2} = \frac{4 \times 0,00333}{\pi(0,05)^2} = 1,696 \text{ m/s}$$

Pour un nombre de coudes égal à 4, la perte de charges singulières est :

$$\Delta H_s = K \frac{U^2}{2g} = 0,25 \frac{1,696^2}{2 \times 9,81} \times 4 = 0,147 \text{ m}$$

Les pertes de charge représentent une pression supplémentaire de 2,258 mCE. Notons que les coefficients (λ) et (K) sont des valeurs courantes rencontrées dans la littérature.

III.4.3 Choix de la pompe

- **Calcul de la puissance hydraulique :**

$$P_{\text{hyd min}} = \text{Besoin d'eau journalier} \times \text{Pression minimale} \times \frac{1000}{36}$$

$$= 12 \times \frac{25 \times 1000 \times 9,81}{10^5} \times \frac{1000}{36} = 817,5 \text{ W}$$

$$P_{\text{hyd max}} = \text{Besoin d'eau journalier} \times \text{Pression maximale} \times \frac{1000}{36}$$

$$= 12 \times \frac{36,1 \times 1000 \times 9,81}{10^5} \times \frac{1000}{36} = 1180,47 \text{ W}$$

La pression maximale correspond à la moyenne entre la pression minimale (25 mCE) pour un débit nul et la pression (47,2 mCE) pour un débit de 12 m³/h ; soit : 36,1 mCE.

La puissance hydraulique nécessaire représente la moyenne entre les puissances hydrauliques minimale et maximale ; soit : $P_{\text{hyd néc}} = 998,98 \text{ W} \approx 999 \text{ W}$.

- **Calcul de la puissance de la pompe :**

Pour un rendement de la pompe immergée estimé à 55%, on calcule la puissance de la pompe comme suit :

$$P_{\text{pompe}} = \frac{P_{\text{hyd néc}}}{\eta} = \frac{999}{0,55} = 1,816 \text{ kW}$$

Pour le choix de la pompe, le logiciel PVsyst dispose d'une base de données qui propose un ensemble de pompes commerciales, et intégrant leurs caractéristiques techniques. Parmi, les pompes proposées par le logiciel, nous avons opté pour la pompe centrifuge immergée Lowara 12GS22T, qui répond parfaitement aux exigences du projet. Cette pompe offre un débit nominal de 10,8 m³/h pour une pression de 42 mCE avec un rendement de 58,1%. La consommation électrique de cette pompe triphasée est de 2,15 kW, ce qui la rend compatible avec notre système de pompage solaire.

III.4.4 Choix du panneau PV

De même, le logiciel PVsyst propose après le choix de la pompe, un ensemble de panneaux photovoltaïques commerciaux. À cet effet, nous avons opté pour le panneau qui présente la puissance maximale ; soit : le panneau de marque Kyocera KD315GX-LPB ayant une puissance nominale de 315 W. Le choix a été guidé par le fait de minimiser le nombre des panneaux.

Aussi, les panneaux photovoltaïques sont orientés avec une inclinaison optimale de 35° pour maximiser l'exposition au soleil et l'efficacité énergétique.

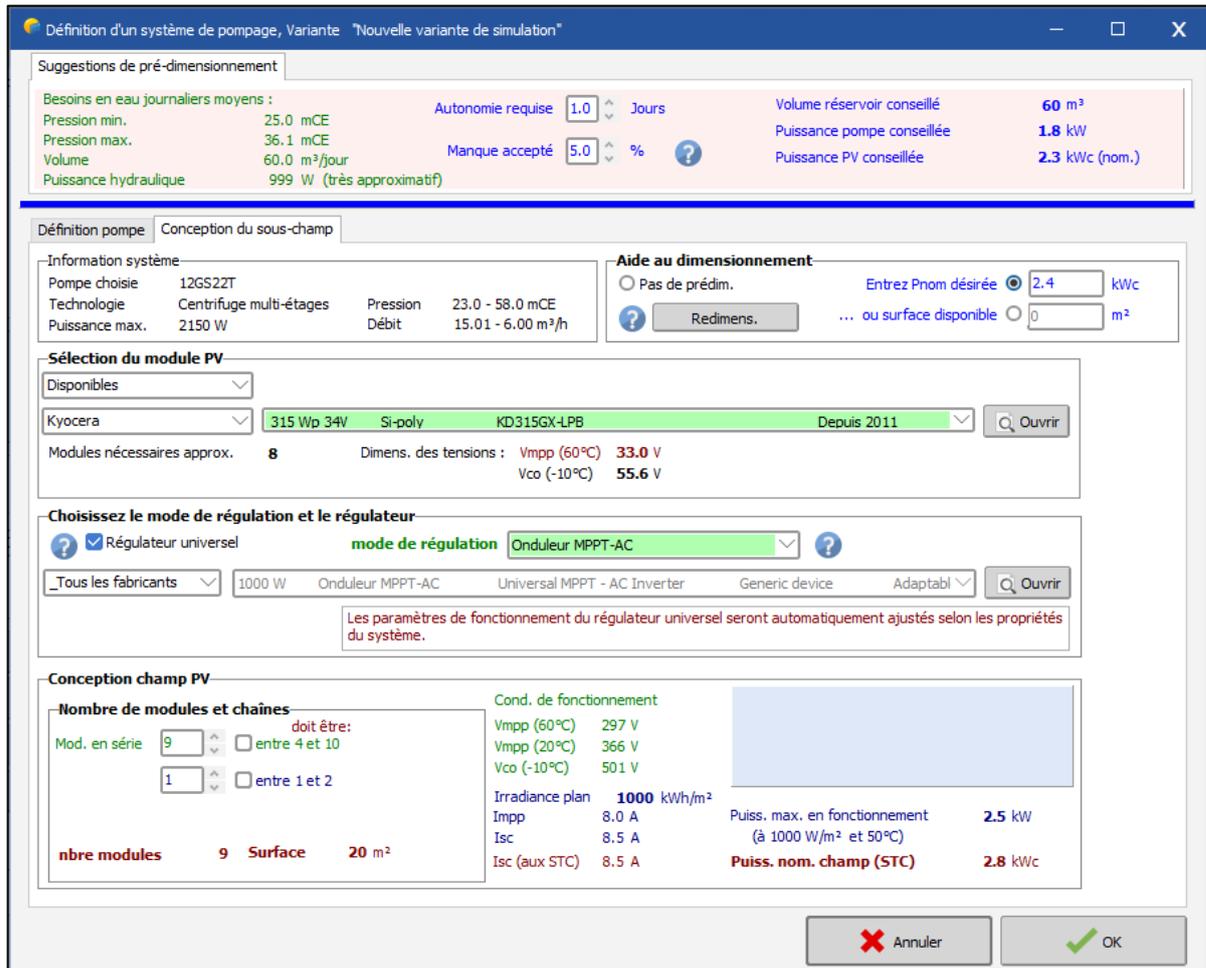


Figure III-5 : Choix de la pompe, du panneau et du mode de régulation.

Pour notre cas, la situation optimale correspond au choix de 9 panneaux disposés en série. Cette configuration permet d'obtenir des performances acceptables.

III.4.5 Résultats de simulation sous le logiciel PVsyst

La simulation a été lancée en suivant les étapes standards de PVsyst avec des ajustements effectués pour optimiser la configuration initiale. Plusieurs essais ont été nécessaires pour atteindre des performances acceptables du système de pompage solaire. Les résultats principaux de la simulation fournissent des informations détaillées sur le volume d'eau pompée, la production d'énergie, et les efficacités relatives à la pompe et au système sous l'impact des conditions météorologiques du site cible. Le tableau qui suit reporte sommairement les principaux résultats. En matière de rendement, les efficacités du système et de la pompe, qui valent respectivement 78,6% et 58,3%, sont satisfaisantes.

Eau		Energie		Efficacité	
Eau pompée	20846 m ³ /an	Energie à la pompe	3895 kWh/an	Efficacité du système	78,6 %
Besoins d'eau	21900 m ³ /an	Energie PV inutilisée	716 kWh/an	Efficacité de la pompe	58,3 %
Eau manquante	4,8%	Fraction inutilisée	14,5 %		

Tableau III-1 : Résumé des résultats principaux.

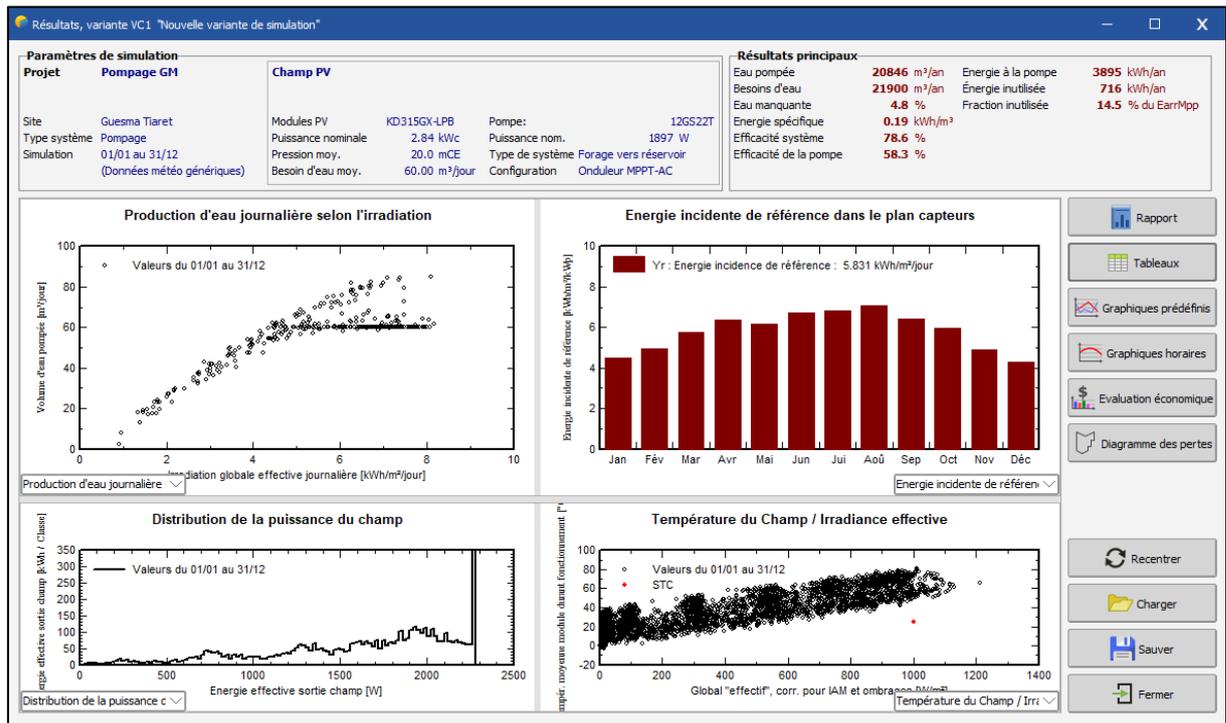


Figure III-6 : Résultats de simulation sur PVsyst.

	GlobEff	EArrMPP	E_PmpOp	ETkFull	H_Pump	WPumped	W_Used	W_Miss
	kWh/m ²	kWh	kWh	kWh	mCE	m ³ /jour	m ³ /jour	m ³ /jour
Janvier	136.2	349.0	317.2	11.37	37.96	55.04	54.69	5.315
Février	135.5	343.9	279.8	40.45	36.85	52.73	52.59	7.412
Mars	175.3	430.9	329.2	68.97	37.96	56.36	56.47	3.534
Avril	186.4	455.1	337.2	84.35	37.92	59.71	59.61	0.394
Mai	184.8	441.8	344.0	66.76	36.80	59.22	59.29	0.707
Juin	194.6	447.7	336.3	79.02	37.15	60.07	60.00	0.000
Juillet	204.5	455.0	342.1	76.13	37.87	60.00	60.00	0.000
Août	213.7	473.7	343.9	93.92	38.87	60.00	60.00	0.000
Septembre	187.8	431.4	319.9	82.11	37.69	56.87	56.89	3.109
Octobre	181.4	430.2	340.2	63.85	37.96	58.38	58.44	1.557
Novembre	144.0	360.9	311.6	29.21	37.89	56.00	56.40	3.602
Décembre	130.8	333.4	293.4	20.04	37.75	50.66	50.53	9.475
Année	2075.0	4953.0	3894.7	716.17	37.71	57.11	57.10	2.901

Tableau III-2 : Bilans et principaux résultats.

Aussi, on constate que le manque d'eau atteint un pourcentage de 4,8%. Cette valeur est acceptable du fait qu'on peut admettre un manque maximal de 5%. La fraction d'énergie PV inutilisée représente 14,5% produite ; ce pourcentage peut être réduit en diminuant le nombre de panneaux mais c'est au détriment de la fraction d'eau manquante.

Les résultats obtenus montrent aussi que les volumes d'eau pompée sont les plus faibles en hiver, atteignant leur minimum en décembre en raison de la faible irradiation solaire et de la moindre demande en irrigation. À l'inverse, les volumes sont les plus élevés en été, culminant en juin-août, ce qui correspond aux conditions de forte irradiation et aux besoins accrus en eau pour l'irrigation des cultures. Ces variations saisonnières soulignent l'importance d'optimiser la capacité de stockage d'eau et d'ajuster les stratégies d'irrigation pour maximiser l'efficacité et répondre aux besoins tout au long de l'année.

III.4.5.1 Performances de la pompe

Les figures qui suivent montrent respectivement l'évolution du débit en fonction de l'irradiation et en fonction de la puissance disposée à la pompe.

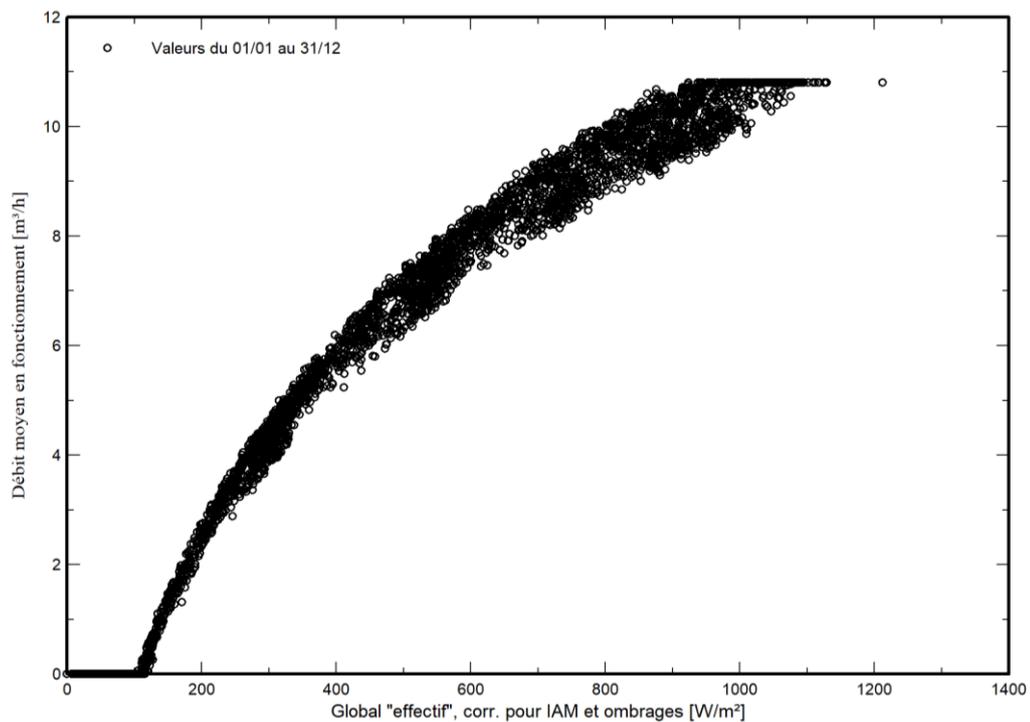


Figure III-7 : Débit en fonction de l'irradiation.

Nous remarquons que le débit maximal en fonctionnement, qui vaut approximativement 11 m³/h, est atteint pour une irradiation supérieure à 1000 W/m².

Aussi, ce débit maximal correspond à la puissance maximale disposée à la pompe ; ce qui est illustrée par le schéma de la figure qui suit.

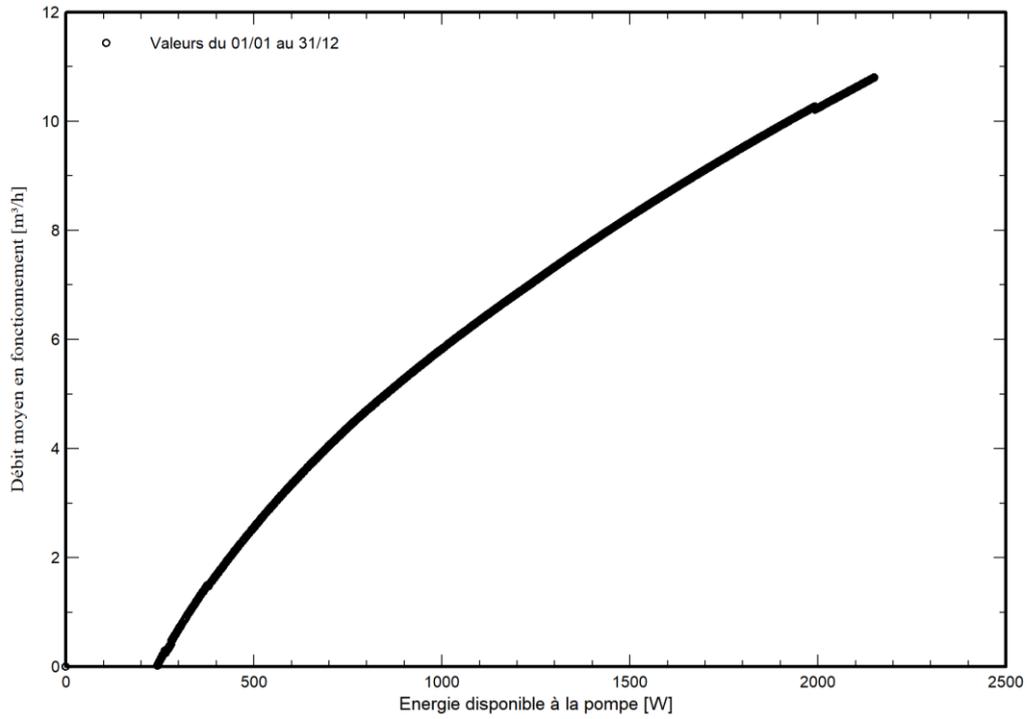


Figure III-8 : Débit en fonction de la puissance à la pompe.

III.4.5.2 Performances du générateur PV

La figure qui suit montre la température moyenne du module photovoltaïque en fonction de l'irradiation sous les conditions d'exploitation.

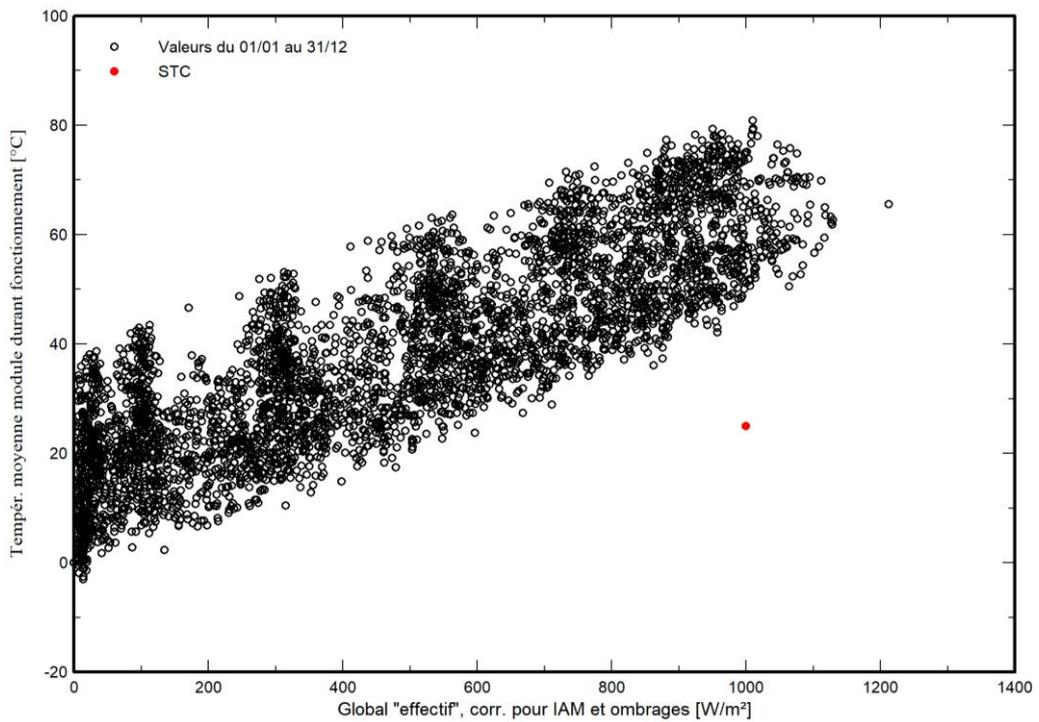


Figure III-9 : Température moyenne en fonction de l'irradiation.

La corrélation entre l'irradiation et la température des modules photovoltaïques indique que plus l'irradiation est élevée, plus les cellules se chauffent. Par contre aux faibles irradiations, les températures sont relativement moindres. Cette relation souligne l'impact des conditions météorologiques et saisonnières sur les performances des panneaux PV où des températures élevées réduisent l'efficacité malgré une forte irradiation. La gestion thermique devient donc cruciale pour optimiser le rendement et la durabilité des systèmes de pompage solaire tout au long de l'année.

Nous allons maintenant aborder la simulation du comportement dynamique du système de pompage solaire sous l'environnement Matlab.

III.5 Simulation du système de pompage solaire sous Matlab

III.5.1 Description du modèle et données de simulation

Rappelons que le système de pompage solaire comprend les éléments suivants :

- Générateur photovoltaïque ;
- Onduleur de tension avec MPPT ;
- Moteur asynchrone ;
- Pompe immergée ;
- Circuit hydraulique.

Ces éléments constitutifs du système de pompage solaire ont été programmé sous Simulink. La figure qui suit montre le schéma block développé pour la simulation du système de pompage solaire.

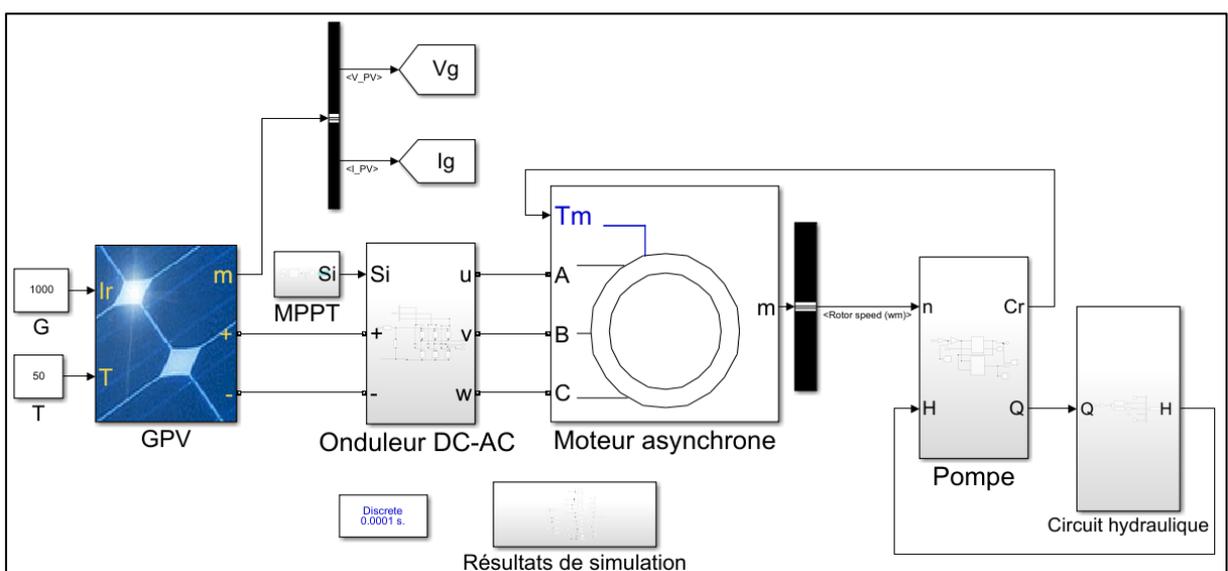


Figure III-10 : Modèle de la simulation sous Matlab.

Pour effectuer la simulation sous Matlab, les données d'entrée se résument ainsi :

- Le point de fonctionnement correspond à la période d'été avec une température de référence de 50 °C et une irradiation de 1000 W/m² (voir figure III-9). Le panneau PV Kyocera KD315GX-LPB est pris de la librairie de Matlab.
- Les caractéristiques $H(Q)$ et $\eta(Q)$ de la pompe sont prises à partir du catalogue fourni par le fabricant.

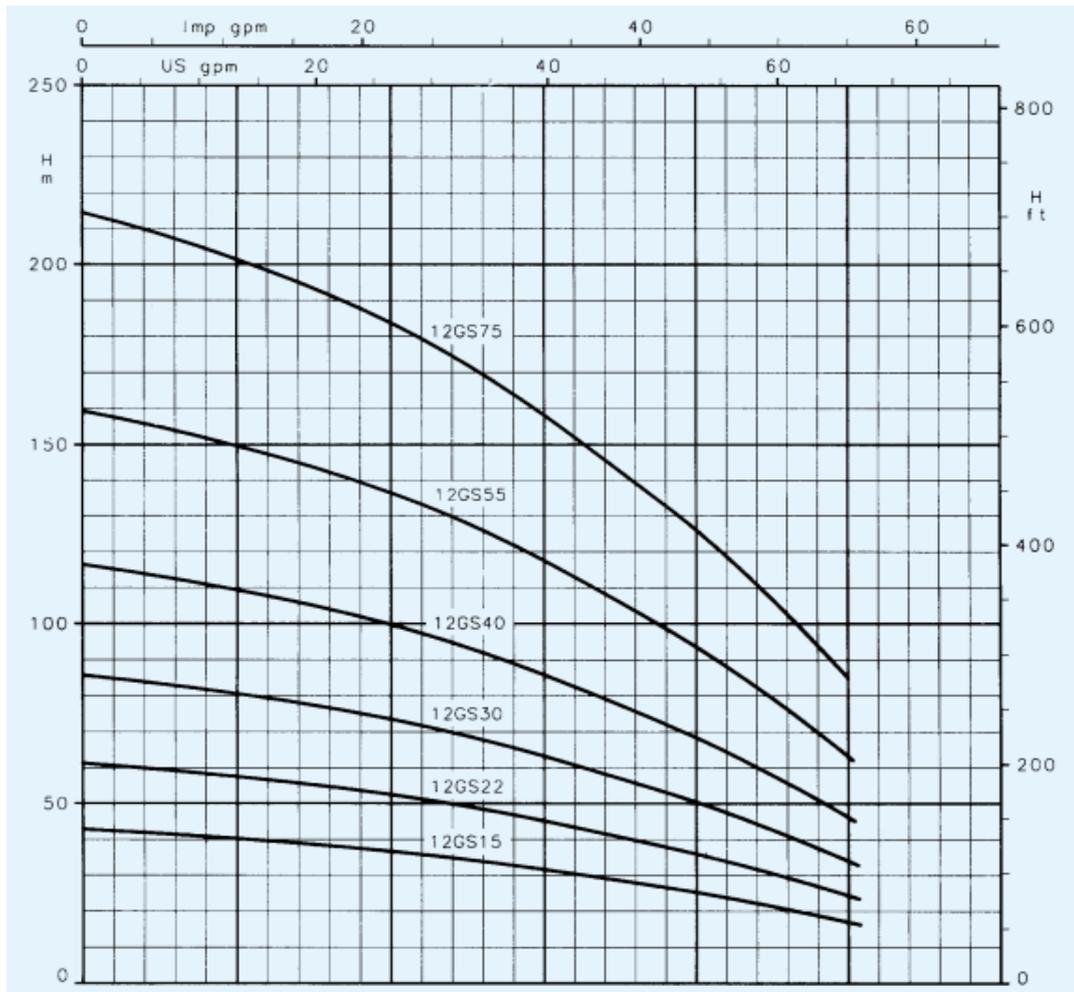


Figure III-11 : Caractéristique $H(Q)$ de la pompe cible.

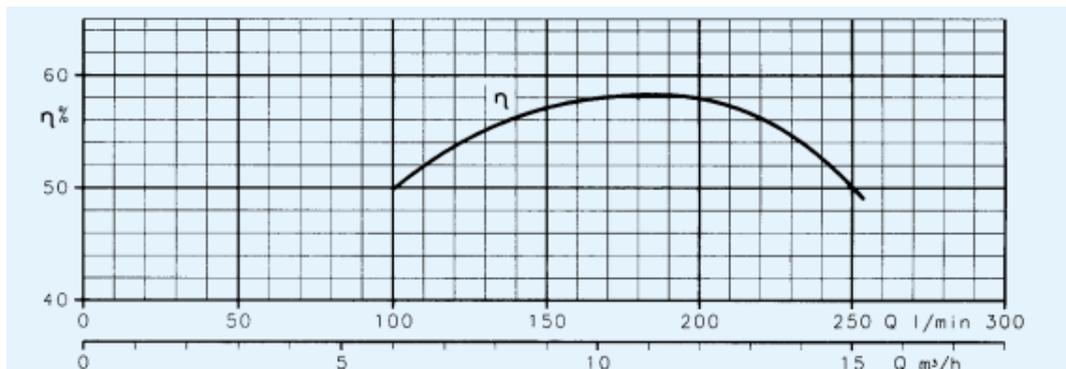


Figure III-12 : Caractéristique $\eta(Q)$ de la pompe cible.

Les coefficients nécessaires au calcul de la hauteur de pompage et du couple résistant sont déterminés à partir de ces dernières courbes tout en se référant aux équations (II.16) et (II.19) ; soit :

$$\begin{cases} K_{H1} = 68.84 \\ K_{H2} = -3.493 \\ K_{H3} = -1.799 \end{cases} \quad \& \quad \begin{cases} K_{T1} = 2.75 \\ K_{T2} = 3.025 \\ K_{T3} = -0.5201 \end{cases}$$

- Les paramètres du moteur correspondent à un moteur asynchrone déjà identifié [35]. Notons que les caractéristiques du moteur ne sont pas fournies dans les catalogues du fabricant de la pompe.
- Pour le circuit hydraulique les pertes de charge seront calculées par les équations (II.20) et (II.25).

Rappelons que la simulation sur Matlab fait suite à des développements déjà effectués au sein du laboratoire de Technologies Industrielles. Après simulation du modèle, les résultats sont reportés dans ce qui suit.

III.5.2 Résultats de simulation sous Matlab

III.5.2.1 Débit de la pompe

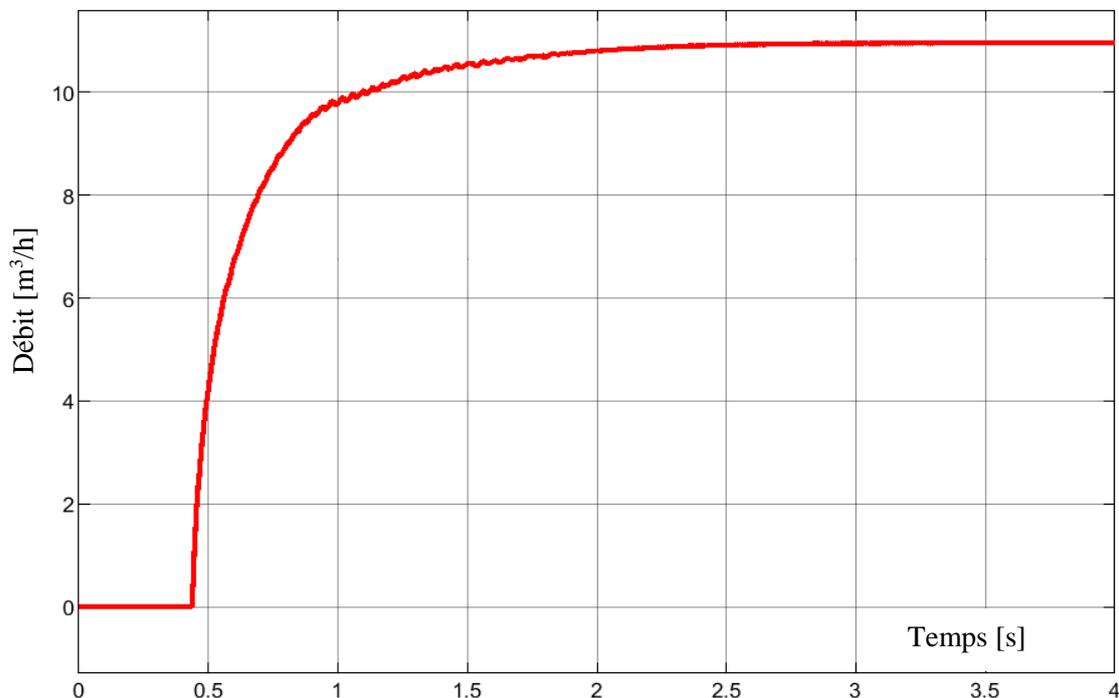


Figure III-13 : Evolution du débit de la pompe.

Nous remarquons que le débit de la pompe atteint une valeur de 10,95 m³/h au bout de 2 s. Cette valeur de débit rejoint celle trouvée lors de la simulation sous PVsyst.

III.5.2.2 Vitesse de rotation de la pompe

La figure qui suit montre l'évolution temporelle de la vitesse de rotation de la pompe.

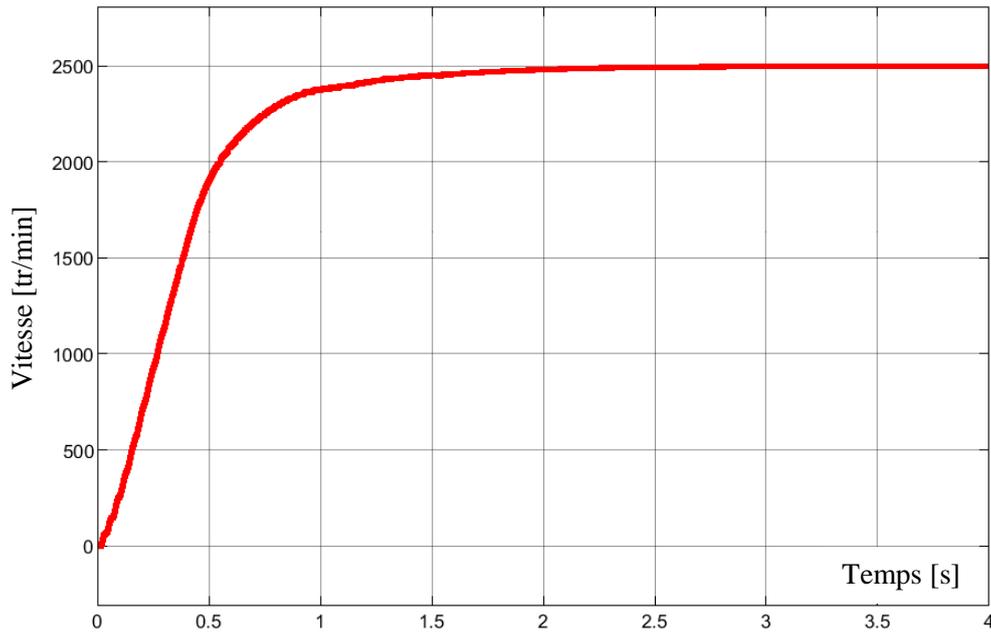


Figure III-14 : Evolution de la vitesse de rotation de la pompe.

Nous remarquons que la vitesse augmente de 0 à 2497 tr/min au bout de 2 s, puis se stabilise à cette valeur. Ceci implique que le système atteint rapidement sa vitesse de fonctionnement et la maintient efficacement.

III.5.2.3 Couple résistant

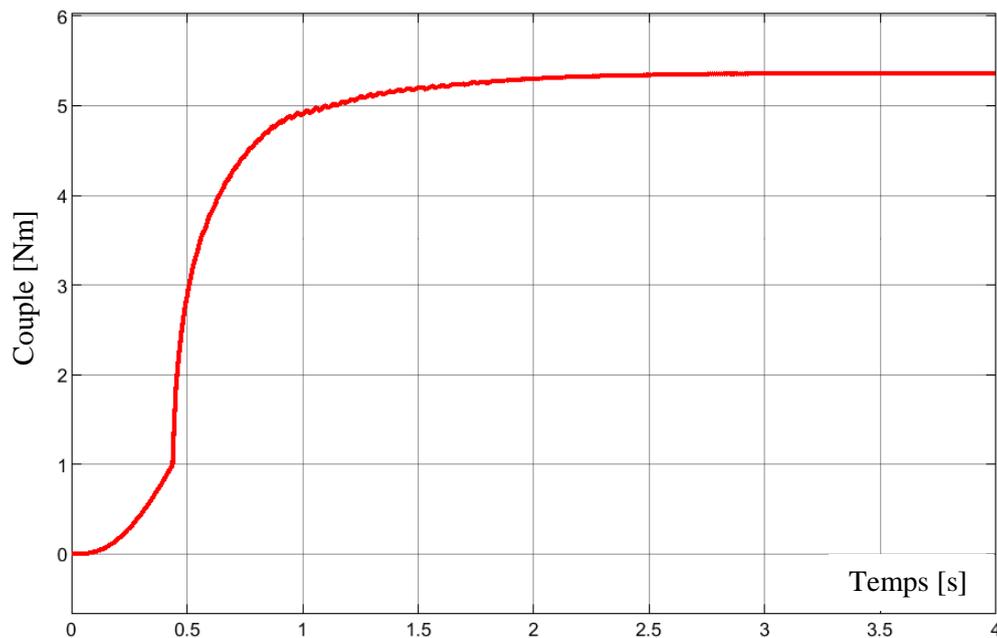


Figure III-15 : Couple résistant en fonction du temps.

Le graphique montre l'évolution du couple résistant au fil du temps. On observe une montée rapide du couple dans les premières secondes, atteignant environ 5,36 Nm avant de se stabiliser.

III.5.2.4 Puissance débitée par le générateur PV



Figure III-16 : Puissance débitée par le générateur PV.

Le graphique présente la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque au fil du temps. La puissance augmente rapidement, atteignant environ 2,73 kW en quelques secondes. On observe des fluctuations pendant la première seconde, probablement dues aux transitoires initiaux du système. Bien qu'il y ait de légères oscillations initiales, la puissance se stabilise rapidement et reste constante. Cela indique que le générateur PV fonctionne de manière stable après la phase initiale de mise en marche, assurant une production d'énergie cohérente.

Aussi, le générateur PV fonctionne avec son MPP, ce qui confirme la bonne tâche du contrôleur MPPT.

Nous allons maintenant essayer la simulation avec d'autres valeurs d'ensoleillement et de température ; ces valeurs sont choisies en se référant à la figure III-9.

III.5.2.5 Influence de l'ensoleillement et de la température

Pour voir l'influence de l'effet d'ensoleillement et de la température, nous considérons une irradiation de 500 W/m^2 avec une température de $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (voir figure III-9) ; soit une baisse de moitié pour l'irradiation.

Les résultats de simulation montrent que la puissance débitée par le générateur PV est réduite

à 1,49 kW. La vitesse de la pompe se retrouve à 1842 tr/min et son débit est égal à 3,3 m³/h. Les figures qui suivent montrent les évolutions respectives du débit de la pompe et de sa vitesse de rotation ainsi que la puissance débitée par le générateur PV.

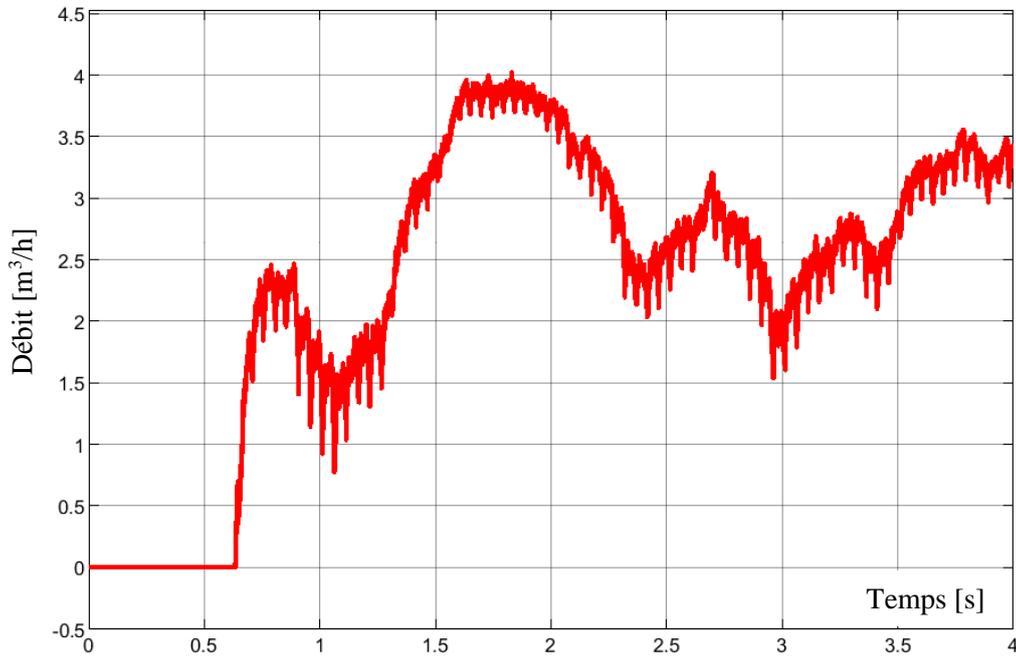


Figure III-17 : Evolution du débit de la pompe ($G = 500 \text{ W/m}^2$ et $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$).

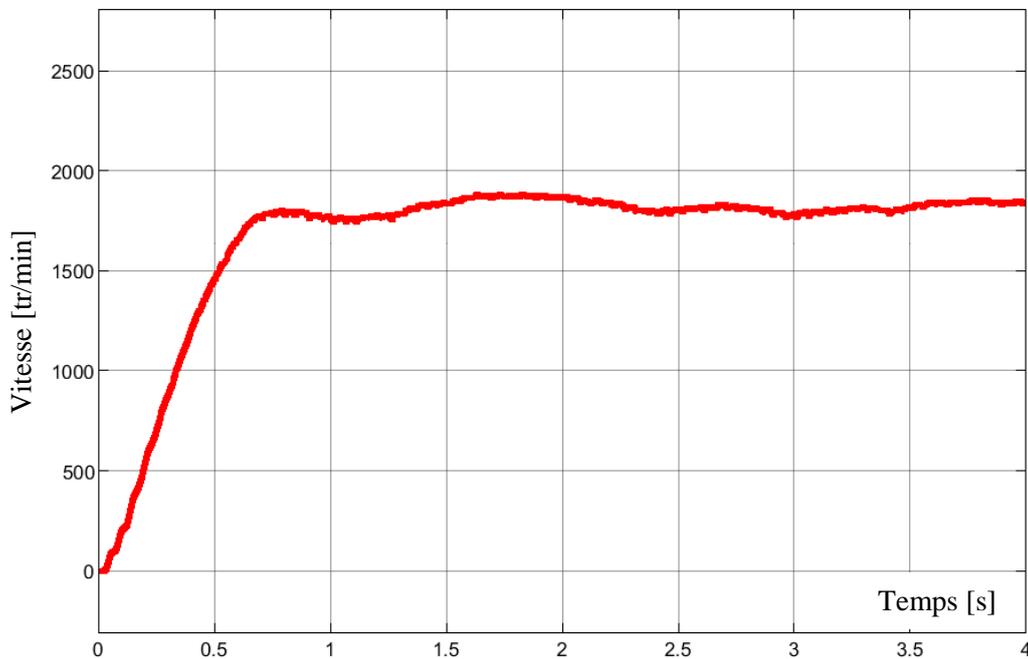


Figure III-18 : Evolution de la vitesse de la pompe ($G = 500 \text{ W/m}^2$ et $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$).

Nous remarquons que les évolutions présentent des fluctuations suite à la baisse de l'ensoleillement.

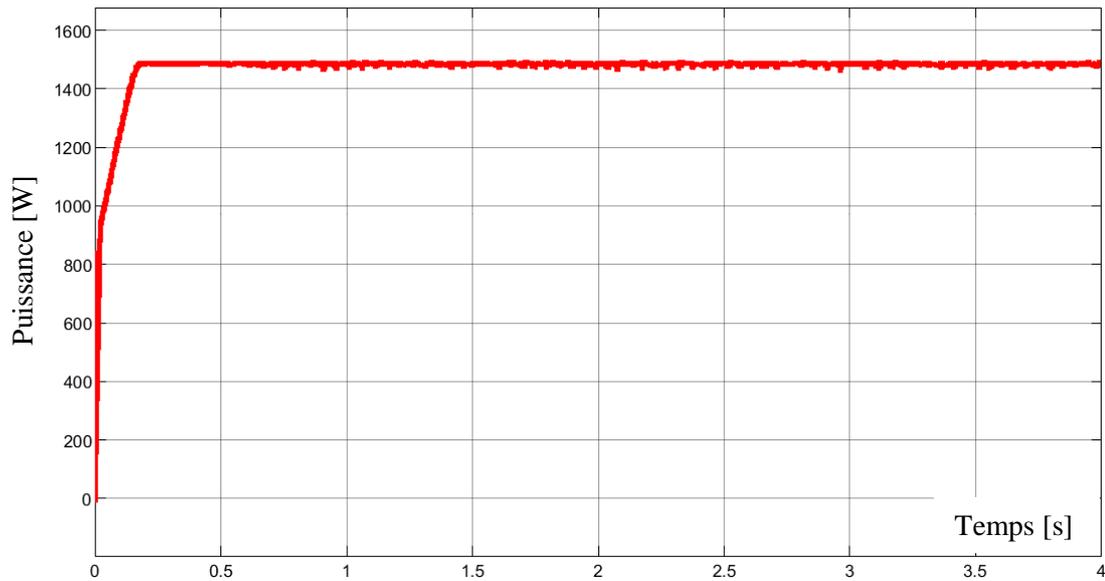


Figure III-19 : Puissance débitée par le générateur PV ($G = 500 \text{ W/m}^2$ et $T = 35 \text{ °C}$).

Malgré que la puissance du générateur PV est stable, la pompe éprouve des difficultés pour pomper un débit stable.

III.6 Interprétation des Résultats

Les résultats de la simulation sous PVsyst et Matlab montrent globalement une bonne concordance, et révèlent plusieurs points clés sur les performances du système de pompage solaire isolé :

- **Variabilité saisonnière** : La performance de production d'énergie et la puissance de la pompe varient considérablement au cours de l'année, atteignant des niveaux maximaux en été et minimaux en hiver. Cette variabilité doit être prise en compte lors du dimensionnement du système pour garantir un approvisionnement en eau suffisant tout au long de l'année.

- **Rôle d'ensoleillement** : L'ensoleillement est le facteur principal influençant la production d'énergie. Les périodes de faible ensoleillement nécessitent une capacité de stockage suffisante pour assurer la continuité du pompage.

- **Impact de la température** : Bien que les températures élevées puissent réduire l'efficacité des panneaux PV, l'effet global sur la production d'énergie reste positif en raison de l'augmentation simultanée de l'ensoleillement et de la température. Cependant, dans des régions extrêmement chaudes, des mesures supplémentaires telles que la ventilation ou l'utilisation de matériaux à haut rendement peuvent être nécessaires.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré l'impact de l'ensoleillement et de la température sur

un système de pompage solaire cible utilisé pour l'irrigation d'un site agricole à Aïn Guesma (Wilaya de Tiaret). Pour ce faire, nous avons utilisé deux outils de simulation : PVsyst et Matlab.

Avec PVsyst, nous avons pu faire le choix de la motopompe et du panneau photovoltaïque, et ce compte tenu du besoin d'eau journalier, et des paramètres relatifs au forage et au circuit hydraulique. La simulation sur le logiciel PVsyst présente des avantages tels que l'importation des conditions météorologiques, et les bases de données relatives aux pompes et panneaux photovoltaïques commercialisés. Parallèlement, la simulation avec Matlab offre la possibilité de visualiser les dynamiques relatives aux régimes de fonctionnement des éléments du pompage solaire ; ceci présente un intérêt pour la stratégie de régulation MPPT.

Les résultats montrent que le volume d'eau pompée est maximal en été en raison du fort ensoleillement, et le manque d'eau pompée correspond à la période hivernale. Ceci est crucial pour adapter la capacité de stockage d'eau et de développer des stratégies d'irrigation saisonnières pour assurer une disponibilité constante en eau.

En combinant les résultats des deux simulations, nous avons pu confirmer que les variations d'ensoleillement et de température ont un impact significatif sur les performances d'un système de pompage solaire.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce projet porte sur l'analyse des effets d'ensoleillement et de la température sur les performances d'un système de pompage solaire.

Dans un premier temps, nous avons présenté des généralités nécessaires à la compréhension d'un système de pompage solaire et les différentes formes d'énergie en nous concentrant, plus particulièrement, sur l'énergie solaire. Ceci, nous a conduit à aborder les éléments liés, d'une part, à l'énergie solaire, et, d'autre part, au système de pompage solaire notamment le panneau photovoltaïque, le convertisseur, le groupe motopompe et le circuit hydraulique.

Dans une seconde étape, nous avons présenté la modélisation mathématique de chaque composante constituant le système de pompage solaire. Pour le panneau photovoltaïque, nous avons relaté le modèle simple et basique en une seule exponentielle. Ensuite, nous avons décrit brièvement le modèle de l'onduleur de tension, et reporté les équations relatives à un moteur asynchrone. Pour la partie hydraulique, nous avons évoqué les modèles caractérisant le fonctionnement d'une pompe tout en tenant compte du régime d'écoulement et des pertes de charge. Aussi, une vision d'optimisation de fonctionnement du système de pompage solaire a été abordée pour faire fonctionner le générateur photovoltaïque à son point de puissance maximale.

En matière d'investigation, nous avons exploré l'impact de l'ensoleillement et de la température sur un système de pompage solaire cible utilisé pour l'irrigation d'un site agricole à Aïn Guesma (Wilaya de Tiaret). Pour ce faire, nous avons utilisé deux outils de simulation : PVsyst et Matlab. Avec PVsyst, nous avons pu faire le choix du groupe motopompe et du panneau photovoltaïque, et ce compte tenu du besoin d'eau journalier, et des paramètres relatifs au forage et au circuit hydraulique. La simulation sous PVsyst présente des avantages tels que l'importation des conditions météorologiques, et les bases de données relatives aux pompes et panneaux photovoltaïques commercialisés. Par contre, la simulation avec Matlab offre la possibilité de visualiser les régimes de fonctionnement des éléments du système pompage solaire.

Concernant les résultats, nous avons observé que le volume d'eau pompée est maximal en été en raison du fort ensoleillement, et le manque d'eau pompée correspond à la période hivernale. Ceci est crucial pour adapter la capacité de stockage d'eau et de développer des stratégies d'irrigation saisonnières pour assurer une disponibilité constante en eau.

Aussi, nous avons pu confirmer que les variations d'ensoleillement et de température ont un impact significatif sur les performances d'un système de pompage solaire.

Conclusion générale

Perspectives :

Les recommandations issues de ce travail peuvent servir de base pour des projets futurs visant à développer des systèmes de pompage solaire plus efficaces et robustes. En adoptant des technologies innovantes et en optimisant l'utilisation de ces systèmes, nous pouvons contribuer de manière significative à une agriculture économique et plus durable.

Ce projet marque a priori une étape initiale dans la recherche et l'innovation dans le domaine des énergies renouvelables appliquées à l'agriculture, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles perspectives pour le développement rural et la gestion durable des ressources en eau.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Hadeif, L. "L'énergie solaire dans l'habitat bioclimatique : Cas de l'habitat individuel à Jijel", Mémoire de Master, Université de Jijel, 2017.
- [2] <https://www.choisir.com/energie/articles/158904/quelles-sont-les-differentes-formes-denergie>.
- [3] <https://ressources-providence.eklablog.com/energie-a184252384>.
- [4] Sorensen, B. "Renewable energy: Physics, Engineering, Environmental impacts, Economics & Planning", 4th ed. Burlington, MA: Academic Press, 2010.
- [5] <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/energie-eolienne-transformer-le-vent-en-electricite>.
- [6] <https://portail.cder.dz/2019/10/21/energies-renouvelables-hausse-attendue-dans-le-monde/>.
- [7] Ginocchio, R., & Viollet, P-L. "L'énergie hydraulique", 1^{ère} édition. Éditions TEC & DOC, 2012.
- [8] <https://www.mon-energie-verte.com/le-point-sur-lenergie-hydraulique/>.
- [9] Mosseri, R., & Jeandel, C., "L'énergie à découvert", CNRS Éditions, 2017.
- [10] https://lenergeek.com/2017/06/13/chaleur-geothermique-energie-renouvelable/#google_vignette.
- [11] Kaltschmitt, M. & Streicher, W. "Energie aus Biomasse", In Regenerative Energien in Österreich: Grundlagen, Systemtechnik, Umweltaspekte, Kostenanalysen, Potenziale, Nutzung, pp. 339-532. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [12] <http://www.bois-energie.be/sous-produits-bois.html>.
- [13] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire>.
- [14] <https://www.lepanneausolaire.com/les-differents-types-de-capteurs>.
- [15] <http://www.libertalia.org/maison/maison-ecologique/energie-solaire/avantages-et-inconvenients-des-panneaux-solaires-3697.html>.
- [16] <https://www.un.org/fr/climatechange/what-is-renewable-energy#:~:text=Les%20%C3%A9nergies%20renouvelables%20sont%20des,sources%20qui%20se%20renouvellent%20constamment>.
- [17] <https://lalgerieaujourd'hui.dz/construction-de-centrales-solaires-signature-de-19-contrats-aujourd'hui/>.
- [18] <https://stock.adobe.com/fr/search?k=sistema+solar>.
- [19] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique-concentration#:~:text=Acteurs%20majeurs-,D%C3%A9finition,petite%20dimension%20%C3%A0%20haute%20performance>.
- [20] Mahamat, S. H., & Djeddah, A. "Détermination du rendement instantané d'un capteur solaire à eau", Mémoire de Master, Université de Tiaret, 2017.
- [21] Atmania, H. "La stratégie d'implantation des énergies renouvelables en Algérie : Cas de la photovoltaïque", Thèse de Doctorat, Université d'Oran, 2015.
- [22] Berrak, A. & Chaab, M. "Panneaux photovoltaïques", Mémoire de Master, Université d'Annaba, 2021.
- [23] Debili, N. "Étude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque", Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2017.
- [24] Saadi, S. "Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan", Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2010.

Références bibliographiques

- [25] Zerrouki, Z., & Bereksi Reguig, R. "Dimensionnement d'un système autonome", Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2017.
- [26] <https://fr.scribd.com/document/496473903/Introduction-Au-Gisement-Solaire-Algerie>
- [27] <https://www.aiguapres.es/fr/avantages-systemes-de-pompage-solaire/>.
- [28] Vincent, D. "Interactions du rayonnement solaire avec l'atmosphère - Effet de serre", Support de cours, ENS Lyon, 2003.
- [29] <https://www.mrpompes.com/fr/product/112>.
- [30] Helali, K. "Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative", Mémoire de Magister, Université de Tizi-Ouzou, 2012.
- [31] https://www.researchgate.net/figure/Equilient-modal-of-PV-Array-II-ph-cell-I-D-5-I-D-I-O-Cell-exp-i-ii-i-i-fig2_328875824.
- [32] Capderou, M. "Atlas solaire de l'Algérie", OPU, 1987.
- [33] Logiciel PVSyst Version 7.4.0, <https://www.pvsyst.com>
- [34] Salmi, M. "Contribution à la quantification de l'irradiation solaire globale en Algérie et applications aux générateurs photovoltaïques", Thèse de Doctorat, Université de Sétif, 2012.
- [35] Belarbi, M. "Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque", Mémoire de Magister, Université d'Oran, 2006.
- [36] <https://www.pompes-japy.fr/conseils-faq/quelle-difference-entre-pompe-immergee-et-pompe-ubmersible#:~:text=La%20pompe%20immerg%C3%A9e%20%3A%20une%20pompe,moteur%20%C3%A9lectrique%20est%20enti%C3%A8rement%20%C3%A9tanche>.

ملخص:

يركز هذا المشروع على تحليل آثار أشعة الشمس ودرجة الحرارة على أداء نظام الضخ الشمسي المستهدف. تحقيقا لهذه الغاية، تم تقديم نماذج رياضية لعناصر نظام الضخ الشمسي. بعد ذلك، تم إجراء محاكاة باستخدام برنامج PVsyst و Matlab. تتميز المحاكاة في PVsyst بمزايا مثل استيراد الظروف الجوية وقواعد البيانات المسوقة المتعلقة بالمضخات والألواح الكهروضوئية. من ناحية أخرى، توفر المحاكاة في Matlab إمكانية رؤية الأنظمة الديناميكية لعناصر نظام الضخ الشمسي. تظهر النتائج أن حجم المياه التي يتم ضخها هو الحد الأقصى في الصيف بسبب أشعة الشمس القوية، ونقص المياه التي يتم ضخها يتوافق مع فترة الشتاء. أيضا، تمكنا من تأكيد أن الاختلافات في أشعة الشمس ودرجة الحرارة لها تأثير كبير على أداء نظام الضخ الشمسي.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية، الضخ الشمسي، أشعة الشمس، درجة الحرارة، PVsyst، Matlab.

Résumé :

Ce projet porte sur l'analyse des effets d'ensoleillement et de la température sur les performances d'un système de pompage solaire cible. À cet effet, une modélisation mathématique des éléments du système de pompage solaire a été présentée. Puis, une simulation sous les logiciels PVsyst et Matlab a été effectuée. La simulation sous PVsyst présente des avantages tels que l'importation des conditions météorologiques, et les bases de données relatives aux pompes et panneaux photovoltaïques commercialisés. Par contre, la simulation sous Matlab offre la possibilité de visualiser les régimes dynamiques des éléments du système pompage solaire.

Les résultats montrent que le volume d'eau pompée est maximal en été en raison du fort ensoleillement, et le manque d'eau pompée correspond à la période hivernale. Aussi, nous avons pu confirmer que les variations d'ensoleillement et de température ont un impact significatif sur les performances d'un système de pompage solaire.

Mots-clés : Energie solaire, Pompage solaire, Ensoleillement, Température, PVsyst, Matlab.

Abstract:

This project focuses on the analysis of the effects of sunlight and temperature on the performance of a target solar pumping system. To this end, a mathematical modeling of the elements of the solar pumping system was presented. Then, a simulation using PVsyst and Matlab software was carried out. Simulation in PVsyst has advantages such as importing weather conditions, and market databases relating to pumps and photovoltaic panels. On the other hand, the simulation in Matlab offers the possibility of visualizing the dynamical regimes of the elements of the solar pumping system. The results show that the volume of water pumped is maximum in summer due to the strong sunshine, and the lack of water pumped corresponds to the winter period. Also, we were able to confirm that variations in sunshine and temperature have a significant impact on the performance of a solar pumping system.

Keywords: Solar energy, Solar pumping, Sunshine, Temperature, PVsyst, Matlab.