

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Électrotechnique
Spécialité : Énergie et environnement

Présenté par : MOHAMMED BELHADJ SOUHEYB

Thème

**ÉTUDE ET RÉALISATION D'UN
SYSTÈME DE POMPAGE
PHOTOVOLTAÏQUE**

Soutenu publiquement, 07/07/ 2019, devant le jury composé de :

Pr.TAHOUR Ahmed	Professeur	ESSA. Tlemcen	Président
Dr.KERBOUA Abdelfattah	MCB	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
Dr.BOUKLI HACENE Fouad	MCA	ESSA. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
Dr.CHEMIDI Abdelkarim	MAB	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
Dr.MEGNAFI Hichem	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2018 /2019

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à qui me sont les plus chers

*A ma très chère mère, mon père, à mes très chers frères
et mes sœurs*

A toute la famille et à tous mes amis

A tous mes amis de la promotion

A tous qui me sont chères

Remerciements

Pour commencer, merci à Allah de m'avoir donné toute la capacité physique et morale pour mener à bien et faire aboutir ce travail. Un travail portant sur un projet de pompage solaire d'une importance capitale pour mon pays, dont les besoins sont très grands pour son développement futur.

Avant tout je remercie Monsieur KERBOUA Abdelfatah, maître de conférences et responsable de la spécialité Electrotechnique (Energie et environnement) à l'Ecole Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen qui m'a fait confiance en acceptant de m'encadrer sur ce sujet. Je lui suis très reconnaissant de l'opportunité qu'il m'a donnée. Ses remarques pertinentes et son esprit de synthèse m'ont permis d'avoir une autre vision sur la problématique. Je le remercie pour l'intérêt et le suivi qu'il a porté à mon projet. J'estime avoir énormément appris à son contact. Son dévouement et sa rigueur scientifique resteront pour moi des modèles.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur BOUKLI HACENE Fouad, maître de conférences, à l'Ecole Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen, qui a co-encadré ce projet de fin d'études et qui m'a bénéficié de ses compétences et de sa disponibilité. Qu'il trouve ici l'expression de ma plus profonde reconnaissance.

Je tiens à remercier chaleureusement les membres du jury, monsieur TAHOUR Ahmed professeur à ESSA.Tlemcen, monsieur CHEMIDI Abdelkarim maître assistance de classe B à ESSA.Tlemcen et monsieur MEGNAFI Hichem maître conférence de classe B à ESSA.Tlemcen qui m'ont corrigé et évalué mon travail, je leur exprime toute ma gratitude.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont de près ou de loin contribué au bon déroulement de ces travaux en commençant par les techniciens de l'école qui m'ont aidé à la réalisation du projet.

Enfin, Je remercie ma famille et mes chers amis pour leur compréhension et soutien moral, j'espère que ce travail soit la bonne expression de ma gratitude.

RESUME

L'utilisation de l'énergie solaire dans les sites isolés pour différentes applications, tel que le pompage d'eau, présente un intérêt primordial pour la population des pays en voie de développement qui n'a pas d'accès sûr à l'eau potable. Mais les générateurs photovoltaïques possèdent deux inconvénients majeurs qui sont un rendement faible et un coup élevé.

Dans le but d'augmenter le rendement de ces systèmes. Une adaptation adéquate entre le générateur solaire et la charge permet de diminuer le coût de l'installation.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation, la simulation, le dimensionnement et la réalisation d'un système de pompage photovoltaïque fonctionnant au fil du soleil. Ce système est constitué d'un ensemble d'éléments se trouvant en interaction ; à savoir les panneaux photovoltaïques, l'onduleur de tension, le moteur asynchrone, la pompe centrifuge et le circuit hydraulique.

Mots-clés :Panneaux photovoltaïque, Energie solaire, Modélisation, Simulation, Dimensionnement et Réalisation, Maximum Power Point Tracking(MPPT), Pompe centrifuge.

المخلص

يعد استخدام الطاقة الشمسية في مواقع معزولة لتطبيقات مختلفة ، مثل ضخ المياه ، من الاهتمامات الرئيسية للأشخاص في البلدان النامية الذين لا يحصلون على مياه آمنة الشرب. لكن المولدات الكهروضوئية لها عيبان رئيسيان هما العائد المنخفض وضربة عالية. من أجل زيادة أداء هذه الأنظمة. التكيف السليم بين المولد الشمسي والحمل يقلل من تكلفة التركيب. يتعلق العمل المقدم في هذه الأطروحة بالنمذجة والمحاكاة والتحجيم وتحقيق نظام الضخ الكهروضوئي الذي يعمل فوق الشمس. يتكون هذا النظام من مجموعة من العناصر المتفاعلة ؛ وهي الألواح الكهروضوئية ، ومحول التيار الكهربائي ، والمحرك غير المتزامن ، ومضخة الطرد المركزي ، والدائرة الهيدروليكية

كلمات مفتاحية : الألواح الضوئية ، الطاقة الشمسية ، النمذجة ، المحاكاة ، التحجيم والإدراك ، الحد الأقصى لتتبع نقطة القدرة، مضخة الطرد المركزي..

Abstract

The use of solar energy in isolated sites for different applications, such as water pumping, is of primary interest to people in developing countries who do not have safe access to water drinking. But photovoltaic generators have two major drawbacks that are a low yield and a high blow.

In order to increase the performance of these systems. Proper adaptation between the solar generator and the load reduces the cost of installation.

The work presented in this memory the modeling, simulation, sizing and realization of a photovoltaic pumping system operating over the sun. This system consists of a set of interacting elements; namely the photovoltaic panels, the voltage inverter, the asynchronous motor, the centrifugal pump and the hydraulic circuit.

Keywords: Photovoltaic panels, Solar energy, Modeling, Simulation, Sizing and Realization, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Centrifugal Pump.

Liste des figures

Figure I-1 Analyse spectrale du rayonnement solaire[4]	5
Figure I-2 Structure typique d'une cellule solaire au silicium.	6
Figure I-3 Courbe caractéristiques d'une cellule PV en mode générateur.	9
Figure I-4 Schéma équivalent d'une cellule PV.....	9
Figure I-5 Le facteur de forme	11
Figure I-6 Le modèle à une seule diode	12
Figure I-7 Influence de la résistance série R_s et de la résistance parallèle R_{sh} [30]	14
Figure I-8 Le modèle à deux diodes pour une modélisation plus exacte	16
Figure I-9 Courbe I-V simulée d'un module solaire : Le circuit équivalent simplifié[31].	17
Figure I-10 Détermination des résistances série et shunt d'une cellule PV	18
Figure I-11 Fonctionnement des cellules solaires en parallèle	19
Figure I-12 Ombrage de l'une des trois cellules PV	20
Figure I-13 Connexion des cellules PV en série	20
Figure I-14 Ombrage partiel d'une cellule PV insérée dans une rangée en série	21
Figure I-15 Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.	22
Figure I-16 Schéma bloc du panneau PV sous Simulink	22
Figure I-17 La caractéristique (I-V) du GPV avec $E=900W/m^2$, $T=250C$	23
Figure I-19 La caractéristique (P-V) du GPV	23
Figure I-19 La caractéristique (P-I) du GPV	23
Figure I-20 : Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V	24
Figure I-21 Effet de la température sur la caractéristique I-V.	25
Figure I-22 Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode (P & O).	26
Figure I-23 recherche du PPM par la méthode (P & O).	27
Figure II-1 Schéma synoptique simplifié de Pompage photovoltaïque avec stockage	30

Figure II-2 Schéma de l'onduleur triphasé.....	31
Figure II-3 Représentation de l'utilisation des interrupteurs.	32
Figure II-4 Pompe (vue ouverte).....	33
Figure II-5 Caractéristiques « HMT – Débit » d'une pompe centrifuge.....	35
Figure II-6 Représentation des enroulements statoriques et rotoriques.	38
Figure II-7 Les différents systèmes d'axes utilisés.	41
Figure III-1 Schéma bloc Simulink de l'onduleur..	45
Figure III-3 La tension de sortie de l'onduleur.	46
Figure III-3 L'analyse spectrale de la tension de sortie de l'onduleur.....	46
Figure III-4 Schéma bloc Simulink de la pompe centrifuge.	46
Figure III-6 Le débit en fonction la vitesse de rotation de la pompe.	47
Figure III-7 Bloc de simulation du système global de pompage.....	48
Figure III-10 la vitesse Ω (rad/s).....	49
Figure III-10 débit d'eau Q (m ³ /h).....	49
Figure III-10 Hauteur manométrique HMT(m)	49
Figure III-11 Influence de la température à un ensoleillement constant.....	50
Figure III-12 Influence de l'ensoleillement à une température constante.....	51
Figure III-13 Schéma synoptique du système de pompage.....	54
Figure III-14 L'installation du panneau solaire.....	55
Figure III-15 photo de l'installation de la canalisation.....	56
Figure III-16 Installation du moto-pompe.....	57
Figure III-17 Onduleur monophasé 500W	58
Figure III-19 Simple régulateur.....	58
Figure III-19 Batterie solaire.....	58
Figure III-20 Courbe de charge d'une batterie [32].	59
Figure III-21 débit d'eau expérimentale.....	60

Sommaire

CHAPITRE I. Théorie et modélisation des panneaux solaires photovoltaïques.....	3
I.1 Introduction	4
I.2 Le rayonnement solaire	4
I.3 Potentiel énergétique solaire en Algérie	5
I.4 Système photovoltaïque.....	6
I.4.1 Structure d'une cellule PV	6
I.4.2 Les principales technologies de cellules photovoltaïques.....	7
I.4.3 Courbes et grandeurs caractéristiques :.....	9
I.4.4 Le courant de court-circuit I_{sc} :	10
I.4.5 La tension de circuit ouvert V_{oc}	10
I.4.6 Le point de puissance maximale (PPM).....	10
I.4.7 Le facteur de forme (FF)	10
I.4.8 Le rendement η d'une cellule photovoltaïque :	11
I.4.9 Influence de la température sur une cellule PV.....	11
I.5 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque réelle.....	12
I.5.1 Le modèle à une seule diode :	12
I.5.2 Le modèle simplifié à une seule diode :	14
I.5.3 Le modèle à deux diodes :	15
I.5.4 Détermination des paramètres du circuit équivalent :	16
I.6 Propriétés des panneaux solaires :	19
I.6.1 Connexion de cellules solaires en parallèle.....	19
I.6.2 Branchement en série de cellules solaires	20
I.7 Protections des GPV	21
I.8 Simulation de la caractéristique électrique du panneau PV	22
I.9 Techniques de la MPPT.....	25
I.9.1 Algorithme de perturbation et observation.....	25
I.10 Conclusions	27
CHAPITRE II. Systèmes solaires photovoltaïques de pompage.....	28
II.1 Introduction	29
II.2 Constitution d'un système de pompage solaire	29
II.3 Modélisation de chaque élément du système	30
II.3.1 Régulateur de charge solaire	30

II.3.2	Modélisation du convertisseur DC-AC	30
II.3.3	Modélisation de la pompe centrifuge	32
II.3.4	Modélisation du Moteur Asynchrone	37
II.4	Conclusion	43
CHAPITRE III. Simulation et réalisation du système de pompage photovoltaïque.....		44
III.1	Introduction	45
III.2	Simulation du système de pompage photovoltaïque	45
III.2.1	Simulation de l'onduleur	45
III.2.2	Simulation de de la pompe	46
III.2.3	Simulation du système global	47
III.3	L'effet de la température et de l'éclairement.....	50
III.3.1	L'effet de la température	50
III.3.2	L'effet de l'éclairement	51
III.4	Dimensionnement du système de pompage réalisé à l'école	52
III.4.1	Estimation des besoins en eau	52
III.4.2	Puissance hydraulique	52
III.4.3	Puissance mécanique	52
III.4.4	Puissance électrique	52
III.4.5	Puissance électrique demandée	53
III.4.6	La puissance du générateur photovoltaïque	53
III.4.7	Nombre de panneaux.....	53
III.4.8	Energie journalière	53
III.5	Réalisation du système de pompage	54
III.5.1	Le panneau solaire.....	54
III.5.2	Les canalisations	55
III.5.3	Le moto-pompe	56
III.5.4	Le convertisseur	57
III.5.5	Le régulateur	58
III.5.6	L'organisation du pompage.....	59
III.6	Conclusion	60

Liste des abréviations

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur photovoltaïque.

I_{pv} : Courant fournit par la cellule photovoltaïque (A).

I_{ph} : Courant produit par la photopile (A).

I_d : Courant de la diode (A).

I_{sc} : Courant de court-circuit de la cellule(A)

I_s : Courant de saturation de la diode(A).

I_{sh} : Le courant shunt (A).

I_{mpp} : Courant de point de puissance maximale (A).

V_{mpp} : Tension de point de puissance maximale (V).

V_{oc} : Tension en circuit ouvert (V).

V_{th} : Tension thermique(V).

V : Tension aux bornes de la cellule photovoltaïque (V).

FF : Facteur de forme.

α_o : Coefficient de température de I_{sc} (A /°C),

β_o : Coefficient de température de V_{oc} (V/°C),

E : Irradiation solaire sur un plan incliné (W/m²),

m : Coefficient d'idéalité de la diode.

K : Constante de Boltzmann $1.38 \cdot 10^{-23}$ (J/K).

q : Charge d'un électron. $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ (C).

R_s : Résistance série (Ω).

R_{sh} : Résistance shunt (Ω).

J : Moment d'inertie du rotor et des parties tournantes de la machine.

f : coefficient de frottement visqueux.

Ω : Vitesse rotorique du moteur (rad/s).

p : Nombre de paire de pole.

g : Glissement.

l_s : les inductances propres du stator .

l_r : les inductances propres du rotor .

M_s : les inductances mutuelles entre deux phases du stator .

M_r : les inductances mutuelles entre deux phases du rotor.

R_s : la resistance du stator

R_r : la resistance du rotor

HMT : hauteur manométrique totale, en m.

H : Hauteur totale du pompage

H_s : hauteur statique

H_d : somme des pertes linéaires et des pertes singulières.

λ : Coefficient de pertes de charges linéaires.

d :Diamètre de la tuyauterie (m).

L : Longueur de la tuyauterie (m).

g : Accélération de la pesanteur (m/s^2).

v : Vitesse moyenne du fluide (m/s) .

Q :Débit(m^3/s).

K_r : le coefficient de proportionnalité [$Nm/(rad. s^{-1})^2$]

η_p : Le rendement de la pompe.

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays émergents auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, la grande partie de la production de l'énergie électrique est basée sur des ressources non renouvelables comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. En effet, La consommation de ces sources possède des conséquences néfastes sur l'environnement. Par exemple l'émission de gaz à effet de serre provoquant l'augmentation de la pollution et des perturbations climatiques. Ainsi, la production électrique à partir des combustibles est à l'origine de 40% des émissions mondiale de CO₂.

Par opposition, les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité propre et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles; l'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre. D'ailleurs, on parle souvent d'une énergie « verte », puisqu'elle permet d'éviter totalement la pollution produite par les sources traditionnelles.

Parmi toutes les énergies renouvelables, l'énergie solaire est la plus dominante et l'une des plus exploitables. Elle donne à l'utilisateur la possibilité de subvenir sans intermédiaire à une partie de ses besoins. L'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour le pompage de l'eau est bien adaptée dans l'Algérie en raison de l'existence d'un potentiel hydraulique souterrain peu profond, et elle dispose un gisement solaire le plus élevé au monde telle que la durée d'ensoleillement peut atteindre les 3900 heures par an sur le Sahara et la moyenne annuelle d'ensoleillement solaire quotidienne varie de 5 à 7 KWh/m² dans la mesure. Le pompage photovoltaïque est en développement et caractérisée par un coût graduellement en baisse.

Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. Alors que cette première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules, la pompe sans batterie, plus communément appelée "pompe au fil du soleil", utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation. La pompe avec batterie permet de s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et motopompe.

Introduction générale

Les moteurs des pompes solaires de petite puissance (petite HMT et faible débit journalier) sont généralement en courant continu. Cependant, ces dernières années, le moteur asynchrone est de plus en plus utilisé pour les applications de pompages solaires à cause de la diminution du coût de l'onduleur, sa simplicité, sa robustesse et son faible coût.

L'objectif de notre étude des systèmes de pompage photovoltaïque fonctionnent au fil du soleil basé sur un moteur asynchrone entraînant une pompe centrifuge qui aspire l'eau d'un puits et le refoulé (stockage) dans un réservoir. Application sur un site dans l'école supérieure en sciences appliquées de Tlemcen. Dans ce contexte, nous avons structuré notre travail en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté un aperçu théorique sur le générateur photovoltaïque où l'on présentera un modèle de la cellule photovoltaïque. Les influences des différents paramètres électriques et climatiques sur le comportement du générateur PV, y sont présentes.

Le second chapitre donne un aperçu sur le système solaire photovoltaïque de pompage. La constitution du Ensuite, nous présentons une modélisation des éléments principale du système de pompage.

Dans le troisième chapitre nous présentons la simulation du système de pompage photovoltaïque. Ensuite nous présentons une méthode de dimensionnement du système de pompage pour la réalisation du système de pompage solaire sur le site de l'école avec relevé expérimental de mesures et présentation des résultats.

CHAPITRE I. THEORIE ET MODELISATION DES PANNEAUX SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES.

I.1 Introduction

Le soleil est responsable du climat et des phénomènes météorologiques sur la terre et une source énergétique quasiment inépuisable. Le développement de l'exploitation des énergies renouvelables a connu une forte croissance ces dernières années. La production d'électricité par des sources d'énergie renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant les normes écologiques de l'énergie.

L'énergie photovoltaïque est la plus appropriée pour avoir un monde propre et non pollué. Elle se caractérise par la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Parce qu'on n'utilise pas de combustible pour cette conversion autre que le soleil, les systèmes photovoltaïques ne rejettent pas de pollution de l'air ou de l'eau nuisible dans l'environnement, n'épuisent les ressources naturelles et ne mettent pas en danger la santé des animaux ou des humains.

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu sur le potentiel énergétique solaire important en Algérie. Ensuite, nous présentons une étude générale et une modélisation d'une cellule PV, ainsi que la présentation des différents paramètres caractérisant un élément photovoltaïque (cellule, module, string ou champ PV). Aussi nous avons évoqué quelques caractéristiques importantes des cellules photovoltaïques. Enfin, Nous avons simulé l'influence des différents paramètres sur les caractéristiques d'une cellule PV en utilisant l'environnement MATLAB-SIMULINK.

I.2 Le rayonnement solaire

Le soleil est l'origine de toute forme d'énergie sur terre. La production d'électricité photovoltaïque dépend de l'ensoleillement du lieu et de la température, autrement dit de sa localisation géographique, de la saison et de l'heure de la journée.

Le spectre solaire est similaire à un corps noir à une température de 5800 K qui est compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 μm . Il se décompose en trois bandes distinctes comme suit :

- 9% dans la bande des Ultraviolets ($< 0,4 \mu\text{m}$)
- 47% dans la bande visible ($0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$)
- 44% dans la bande des infrarouges ($> 0,8 \mu\text{m}$)

La densité de la puissance solaire reçue sur terre en dehors de l'atmosphère est estimée à 1370 W/m^2 . Cependant, en traversant l'atmosphère, cette quantité s'atténue et perd son intensité. A la surface de la terre, la densité de puissance solaire est égale à 1000 W/m^2 . Elle variera par la suite en fonction de la localisation géographique du site (latitude), la saison, l'heure, les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...), et l'altitude du lieu [1]. La figure I-1 présente l'analyse spectrale du rayonnement solaire.

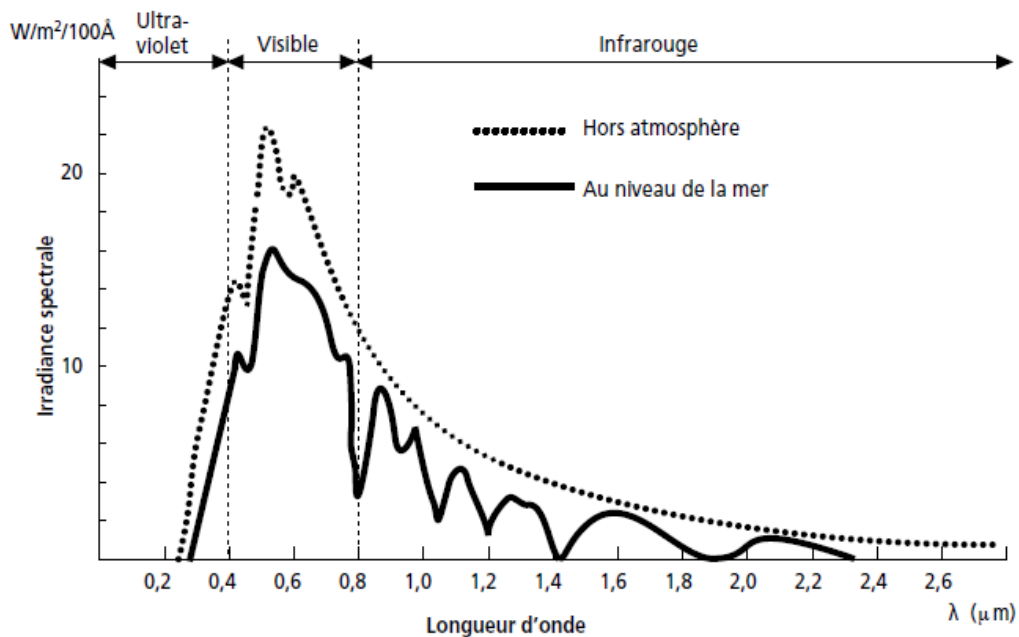


Figure I-1 Analyse spectrale du rayonnement solaire[4]

I.3 Potentiel énergétique solaire en Algérie

De part sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{KWh/m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263 \text{ kwh/m}^2/\text{an}$ au Sud du pays. Le tableau I.1 présente la répartition du potentiel solaire en Algérie par région [2].

Tableau I-1 Potentiel solaire en Algérie

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

I.4 Système photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par la cellule photovoltaïque ou photopile. Elle est fabriquée avec des matériaux semi-conducteurs qui peuvent convertir la puissance des photons lumineux du soleil directement en puissance électrique.

I.4.1 Structure d'une cellule PV

La cellule photovoltaïque est réalisée à partir de deux couches de silicium, une couche dopée p (positive) où la conduction électrique se fait par les trous, et l'autre dopée n (négative) où la conduction se fait par des électrons créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges négatives) et des trous (charges positives). Alors une différence de potentiel est créée entre les deux couches [3]; comme l'illustre la figure I-2,

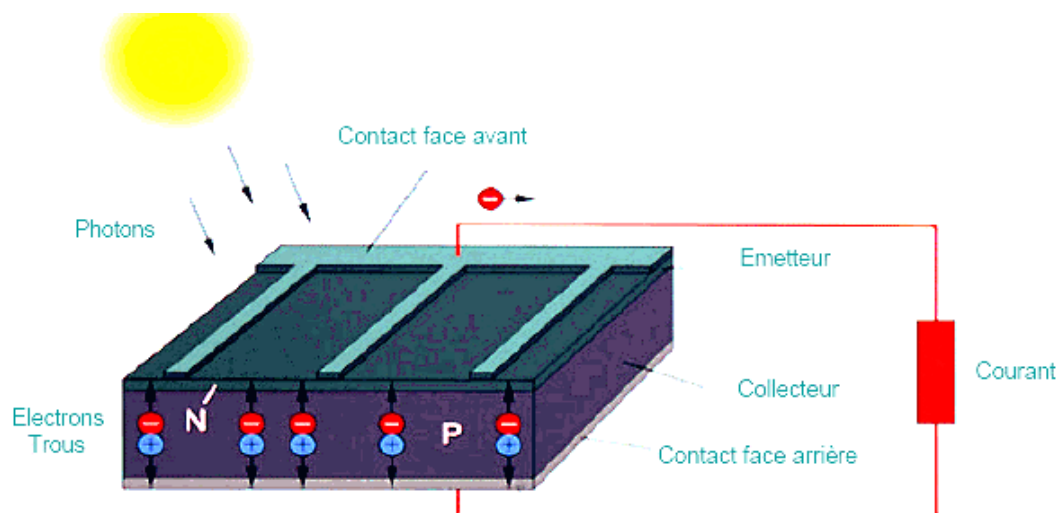


Figure I-2 Structure typique d'une cellule solaire au silicium.

Une fois exposé à la lumière, chaque photon qui pénètre dans la cellule solaire génère une paire électron-trou. Les particules se séparent alors du champ de la région d'espace et se déplacent vers les contacts de la cellule : les trous vers la base et les électrons vers l'émetteur vers l'avant de la cellule (face exposée au soleil). Les porteurs de charges seront ensuite collectés via la grille métallique et véhiculés sur les deux barres métalliques épaisses et une charge reliée à cette cellule peut récupérer de l'énergie électrique générée.

I.4.2 Les principales technologies de cellules photovoltaïques

On distingue trois grandes familles de cellules solaires [5][7]:

- Le silicium cristallin.
- Les cellules à pérovskites
- Les cellules organiques.

I.4.2.1 Le silicium

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin. Il existe trois formes de cristaux :

Le silicium monocristallin : Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme. Elle a comme avantage :

- Un bon rendement, de 16 à 24 % (en 2015) (~150 W/m²),
- Un nombre de fabricants élevé.

Cependant, elle a:

- Un coût élevé,
- Un rendement plus faible sous un faible éclaircissement ou un éclaircissement diffus,
- Baisse du rendement quand la température augmente.

Le silicium poly-cristallin : Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

Elle a comme avantages :

- Cellule carrée permettant un meilleur foisonnement dans un module ;

- Bon rendement de conversion, environ 100 W/m^2 , mais un peu moins que le monocristallin ;
- Rendement de 14 à 18 %; et lingot moins cher à produire que le monocristallin.

Cependant, elle a : un rendement faible sous un faible éclairement ou soleil diffus.

Le silicium amorphe : Les cellules photovoltaïques en silicium amorphe sont fabriquées par dépôts sous vide, à partir de plusieurs gaz, une des techniques les plus utilisées étant la PECVD. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires ». Elle a comme avantages :

- De fonctionner avec un éclairement faible ou diffus (même par temps couvert, y compris sous éclairage artificiel de 20 à 3 000 lux),
- D'être un peu moins chère que les autres techniques,
- D'être intégrable sur supports souples ou rigides.

Elle a cependant pour inconvénients :

- Un rendement faible en plein soleil, de 5 à 7 %
- Une nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin (ratio W/m^2 plus faible, environ 60 W/m^2)
- Une performance qui diminue avec le temps dans les premiers temps d'exposition à la lumière naturelle (3-6 mois), pour se stabiliser ensuite (-10 à -20 % selon la structure de la jonction)

I.4.2.2 Une cellule photovoltaïque à pérovskites

Une cellule photovoltaïque à pérovskites est un type de cellule photovoltaïque qui a un élément chimique ayant une structure de pérovskite, le plus souvent un hybride organique-inorganique de plomb ou un halogénure d'étain, dans sa couche active. L'efficacité des cellules photovoltaïques utilisant ces matériaux est en constante augmentation depuis la fin des années 2000. Elle est passée de 3,8 % en 2009 à 22,1 % au début de 2016, ce qui en fait en 2016 la technologie solaire ayant eu le développement le plus rapide de l'histoire. Cependant avec un potentiel encore important d'amélioration de la performance et des coûts de production faibles, les cellules à pérovskite sont devenues commercialement attractives, et des start-up annoncent déjà des modules sur le marché d'ici 2017

I.4.2.3 Les cellules organiques

Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Elle a un rendement à minima de 15 %. Elles restent à l'état de recherche.

I.4.3 Courbes et grandeurs caractéristiques :

La courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque correspond bien à une photodiode. Le principe du générateur la cellule PV est représenté dans la figure I-3.

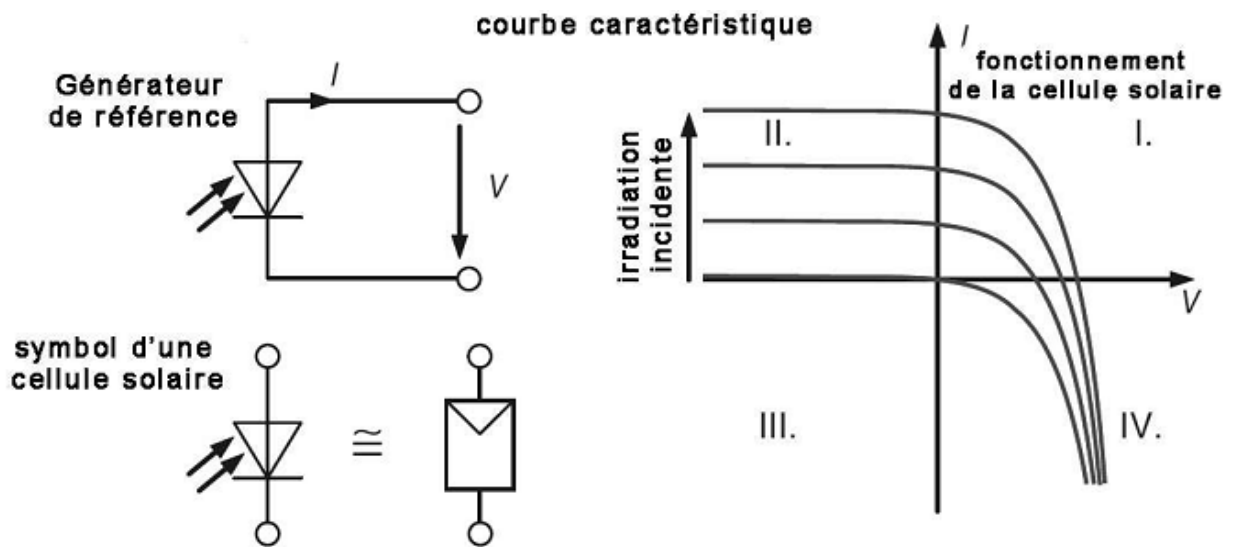


Figure I-3 Courbe caractéristiques d'une cellule PV en mode générateur.

Il faut noter que comparativement à une photodiode, le sens de la tension est conservé par contre celui du courant est inversé pour préserver la convention génératrice[7].

Le schéma électrique équivalent qui décrit le fonctionnement réel de la cellule PV est présentée en figure I-4

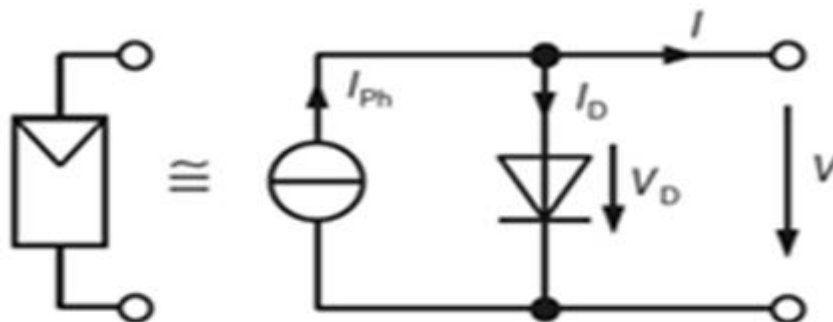


Figure I-4 Schéma équivalent d'une cellule PV

A partir du schéma équivalent présenté en figure I-3, l'équation de la courbe caractéristique est donnée comme suit :

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \quad (I.01)$$

Avec : I_{ph} est le photo-courant, I_s le courant de saturation de la diode, m le facteur d'idéalité compris entre 1 et 2, V la tension aux bornes de la cellule PV, I le courant produit par cette dernière et V_T la tension thermique de la diode.

I.4.4 Le courant de court-circuit I_{sc} :

Le courant de court-circuit d'une cellule photovoltaïque est défini pour une tension nulle ($V=0$). On obtient alors de l'équation I.01 comme suit [7]:

$$I_{sc} = I_{ph} \quad (I.02)$$

Ceci montre que le courant de court-circuit n'est en réalité que le photo-courant qui est proportionnel à l'intensité de l'irradiation solaire.

I.4.5 La tension de circuit ouvert V_{oc}

Cette tension est obtenue par la résolution de l'équation I.01 pour un courant I nul, exprimée par la formule (I.03) [10]:

$$V_{oc} = V(I = 0) = m \cdot V_T \cdot \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_s}\right) \quad (I.03)$$

Il faut noter que la tension du circuit ouvert, V_{oc} varie uniquement avec l'intensité d'irradiation.

I.4.6 Le point de puissance maximale (PPM)

Le point de puissance maximale (PPM), représenté par la figure I.4, correspond au courant I_{MPP} et à la tension V_{MPP} . Il est défini comme un point dans lequel la charge est alimentée par un maximum de puissance.

I.4.7 Le facteur de forme (FF)

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule, il est défini par le rapport entre la puissance délivrée à la charge et le produit de I_{sc} et V_{oc} , autrement dit, il est défini par la relation entre la puissance du MPP et le produit de la tension du circuit ouvert par le courant de court-circuit, décrit par l'équation (I.04)[10] :

$$FF = \frac{I_{MPP} \cdot V_{MPP}}{I_{sc} V_{oc}} = \frac{P_{MPP}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (I.04)$$

La figure I-5 présente le facteur de forme, qui est défini par le quotient de la surface hachurée sur la surface non hachurée.

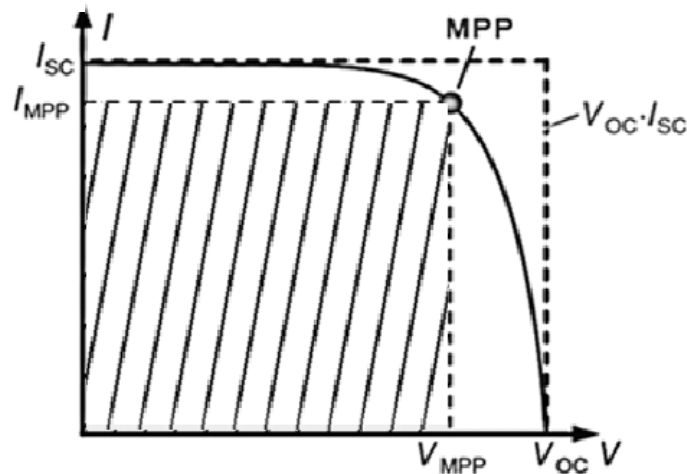


Figure I-5 Le facteur de forme

Le facteur de forme prend des valeurs comprises entre 0,75 et 0,85 pour une cellule PV à base de silicium et des valeurs comprises entre 0,60 et 0,75 pour des matériaux à base des couches minces.

I.4.8 Le rendement η d'une cellule photovoltaïque :

Le rendement η d'une cellule PV est défini par le rapport de la puissance électrique au PPM sur la puissance optique incidente, présenté par la formule I.05

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{opt}} = \frac{P_{MPP}}{A \cdot E} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{A \cdot E} \quad (I.05)$$

Sachant que E représente l'intensité d'irradiation solaire et A la surface effective de la cellule PV. Il faut noter à l'état actuel que les valeurs du rendement d'une cellule photovoltaïque à base du silicium sont comprises entre 15% et 22%.

I.4.9 Influence de la température sur une cellule PV

Une élévation de la température d'un semi-conducteur conduit à une augmentation du mouvement thermique de l'électron intégré dans la maille du cristal. A cet effet, les électrons seront arrachés de leurs orbites vers la bande de conduction et par conséquent la concentration intrinsèque des porteurs de charge augmente et provoque une augmentation du courant de

saturation I_s . D'après l'équation I.03, une augmentation du courant I_s conduit à une réduction de la valeur de la tension en circuit ouvert V_{oc} . Dans la littérature, on trouve l'influence de la variation de la température sur V_{oc} pour une cellule solaire au silicium pour une valeur de $-2,3$ mV/K. Cependant l'influence de la variation de la température sur le courant de court-circuit reste insignifiante [10].

La connaissance de l'influence de la variation de la température sur la puissance est d'un intérêt particulier pour les utilisateurs d'une cellule photovoltaïque. Ainsi, l'augmentation de la température induit la dégradation de la puissance de la cellule PV au silicium de $0,4$ à $0,5$ /K. Autrement dit, la puissance d'une cellule solaire est réduite d'environ 5% avec une augmentation de température de 10 K [8].

I.5 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque réelle

Il existe plusieurs modèles électriques d'une cellule photovoltaïque dont deux modèles sont les plus utilisés [9] :

- Le modèle standard (Modèle à une seule diode)
- Le modèle à deux diodes

I.5.1 Le modèle à une seule diode :

Le schéma électrique du modèle simplifié de la figure I.6-a, a été déjà traité dans la partie I.4.2.

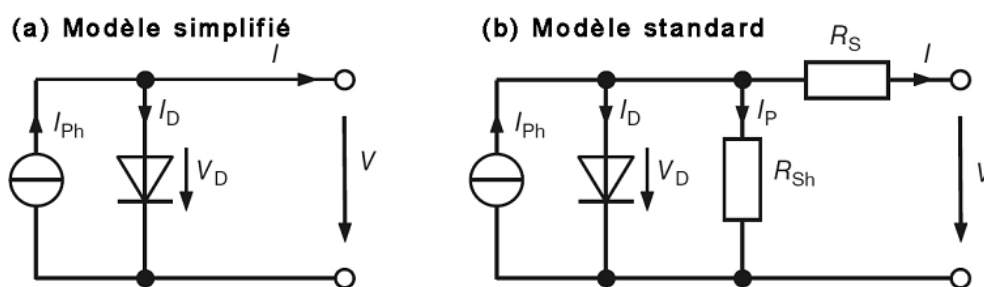


Figure I-6 Le modèle à une seule diode

Cependant, le modèle standard, représenté dans la figure I.6-a, décrit d'une façon approfondie les pertes électriques dans une cellule photovoltaïque. La résistance en série R_s modélise les pertes Ohmiques dans les contacts avant de la cellule photovoltaïque et à l'interface métal semi-conducteur. En revanche, la résistance en parallèle, R_{sh} décrit les pertes relatives aux courants de fuite sur les bords de la cellule.

Pour obtenir les courbes caractéristiques du modèle standard, le courant délivré par une cellule PV devient :

$$I = I_D - I_P \quad (I.06)$$

Ainsi, on détermine le courant à travers la résistance parallèle R_{sh} par la relation I.07 :

$$I_P = \frac{V_D}{R_{sh}} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (I.07)$$

On déduit alors, une équation non linéaire qui décrit les courbes caractéristiques du modèle standard de la cellule photovoltaïque, exprimée par la formule I.08 :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V + I \cdot R_s}{mV_T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (I.08)$$

On montre dans la figure I-7 que l'augmentation de la résistance en série R_s affecte les courbes caractéristiques et diminue considérablement le facteur de forme 'FF' et par conséquent on aura la diminution du rendement énergétique de la cellule photovoltaïque. La situation est similaire dans le cas d'une augmentation des valeurs de R_{sh} qui affecte la tension en circuit ouvert. Cependant, une augmentation du courant I_P provoque une chute importante de tension de la diode V_D .

Il faut noter que dans l'obscurité, la cellule photovoltaïque fonctionne comme une diode. Elle ne produit pas du courant. Cependant, si elle est connectée à une source externe de tension, un courant I_D circule, (I_D le courant de la jonction non éclairée).

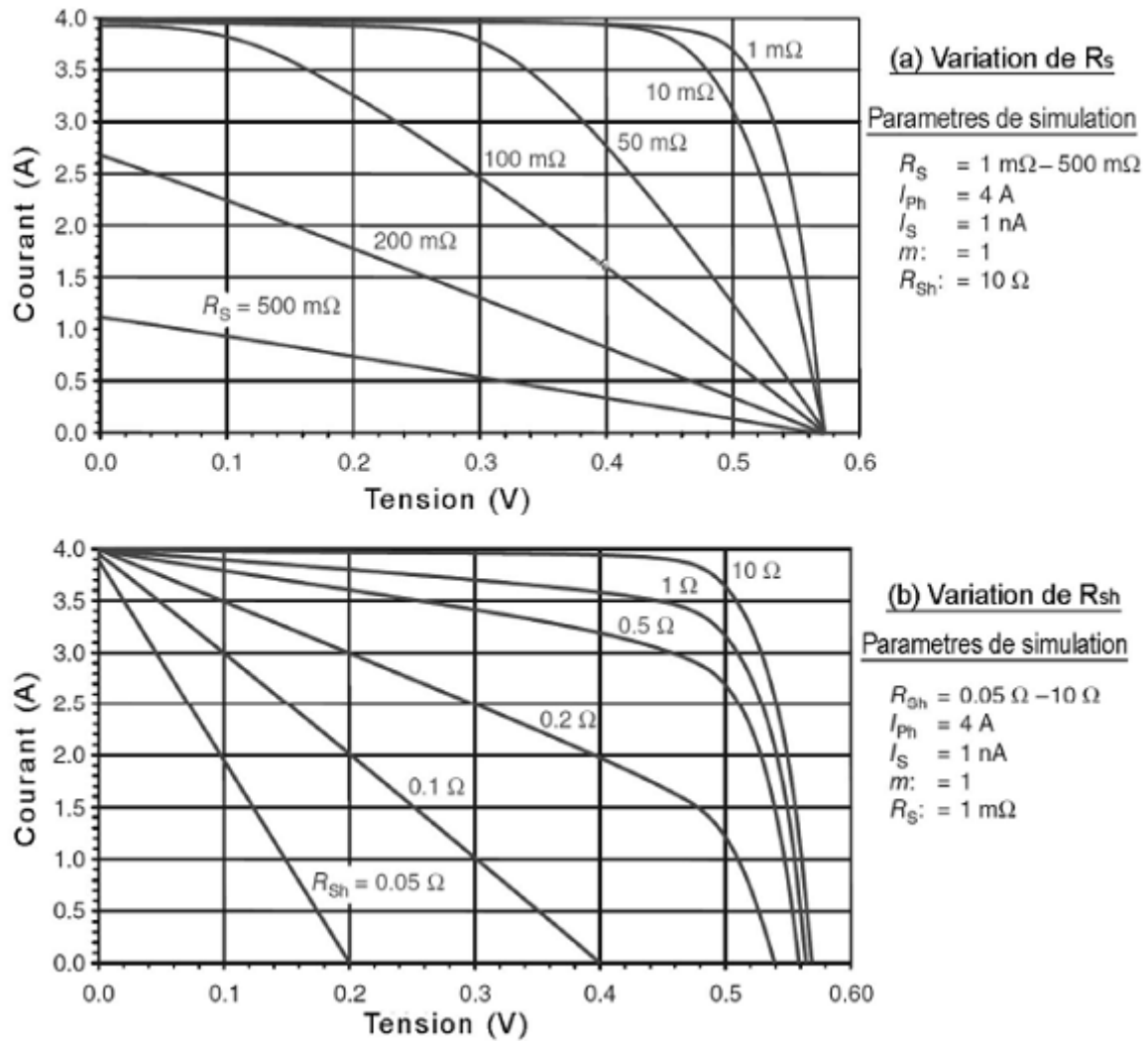


Figure I-7 Influence de la résistance série R_s et de la résistance parallèle R_{sh} [30]

I.5.2 Le modèle simplifié à une seule diode :

Le circuit équivalent de la cellule solaire utilisée dans cette étude est encore simplifié. La relation du courant en fonction de la tension peut être approximativement exprimée par des équations [20] :

$$I = I_{sc} \left(1 - C_1 \left[\exp\left(\frac{V}{C_2 V_{oc}}\right) - 1 \right] \right) \quad (I.09)$$

Avec :

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \cdot \exp\left(-\frac{V_m}{C_2 V_{oc}}\right) \quad (I.10)$$

$$C_2 = \frac{\left(\frac{V_m}{V_{oc}} - 1\right)}{\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right)} \quad (\text{I. 11})$$

I_{sc} : Courant de court-circuit du module (A),

V_{oc} : Tension de circuit ouvert du module (V),

I_m : Courant maximal dans les conditions standards (A),

V_m : Tension maximale du module dans les conditions standards (V),

L'adaptation de l'équation (1) à d'autres niveaux d'insolation et des températures, le modèle décale n'importe quel point (V_{ref}, I_{ref}) des courbes de référence $I-V$ à un nouveau point (V_{nov}, I_{nov}) sur la base des équations suivantes :

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (\text{I. 12})$$

$$\Delta I = \alpha_o \left(\frac{E}{E_0}\right) \Delta T + \left(\frac{E}{E_0} - 1\right) I_{sc} \quad (\text{I. 13})$$

$$\Delta V = -\beta_o \Delta T - R_s \Delta I \quad (\text{I. 14})$$

$$I_{nov} = I_{ref} + \Delta I \quad (\text{I. 15})$$

$$V_{nov} = V_{ref} + \Delta V \quad (\text{I. 16})$$

Avec :

E : Irradiation solaire sur un plan incliné (W/m^2),

E_0 : Irradiation solaire de référence (1000 W/m^2),

α_o : Coefficient de température de I_{sc} ($\text{A}/^\circ\text{C}$),

β_o : Coefficient de température de V_{oc} ($\text{V}/^\circ\text{C}$),

T : Température de la cellule photovoltaïque ($^\circ\text{C}$),

T_{ref} : Température de référence de la cellule photovoltaïque (25°C).

I.5.3 Le modèle à deux diodes :

Dans une cellule photovoltaïque réelle, le phénomène de recombinaison représente des pertes importantes ; lesquelles ne peuvent pas être convenablement modélisées en utilisant le modèle à une diode. La considération de ces pertes conduit à introduire une seconde diode dans le circuit comme le montre la figure I-8:

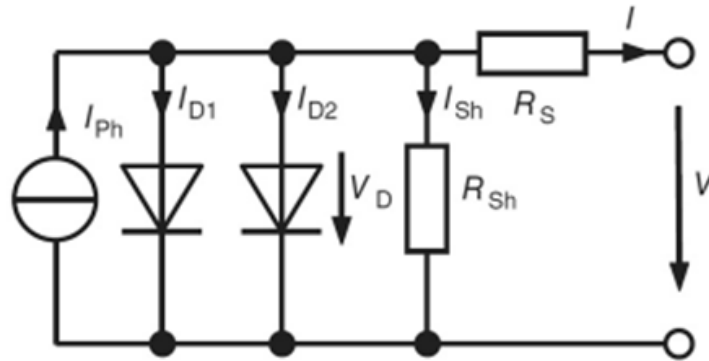


Figure I-8 Le modèle à deux diodes pour une modélisation plus exacte

Cependant, l'équation de la courbe caractéristique du modèle à deux diodes peut être décrite, par analogie à l'équation I.13, par :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{V+I.R_s}{m_1 V_T}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{V+I.R_s}{m_2 V_T}} - 1 \right) - \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \quad (I.17)$$

Ou: I_{s1} et I_{s2} sont les courants de saturation inverse de la diode 1 et de la diode 2. Le terme I_{s2} est introduit pour compenser la perte de recombinaison dans la jonction.

Il faut noter que le modèle à une diode est facile à mettre en œuvre, mais moins précis que le modèle à deux diodes. La méthode itérative décrite dans [4] est la meilleure. Cependant, sa précision se détériore pour des faibles irradiations, notamment aux voisinages de la tension de circuit ouvert [5]. L'introduction de la seconde diode dans le circuit fait augmenter le nombre de paramètres à sept (7): le courant de saturation inverse et le facteur d'idéalité de la seconde diode viennent s'ajouter. La détermination de tous les paramètres du modèle constitue le problème majeur.

I.5.4 Détermination des paramètres du circuit équivalent :

Les paramètres du circuit équivalent simplifié peuvent être déterminés à partir de la courbe (I-V) mesurée si cette dernière est disponible. Comme décrit plus haut, le photo-courant I_{ph} peut être définie comme égale au courant de court-circuit I_{sc} . En Outre, et pour un facteur d'idéalité unitaire ($m=1$), le courant de saturation est alors déterminé à partir de l'équation I.4 par :

$$I = I_{sc} e^{-V_{oc}/V_T} \quad (I.18)$$

Cependant, il y a une discordance entre la courbe (calculée) théorique à partir de ces paramètres avec la courbe (originale mesurée) en pratique. La Figure I.9 présente les courbes théorique et pratique (mesurées et simulées) d'un module solaire. L'image de gauche de la figure I.9, montre une courbe simulée basé sur le circuit équivalent simplifié. L'écart est, évident entre la pratique et la simulation, même après l'optimisation des paramètres persiste. Par contre on a la concordance entre la mesure et la simulation dans l'image droite de la figure I-9 .

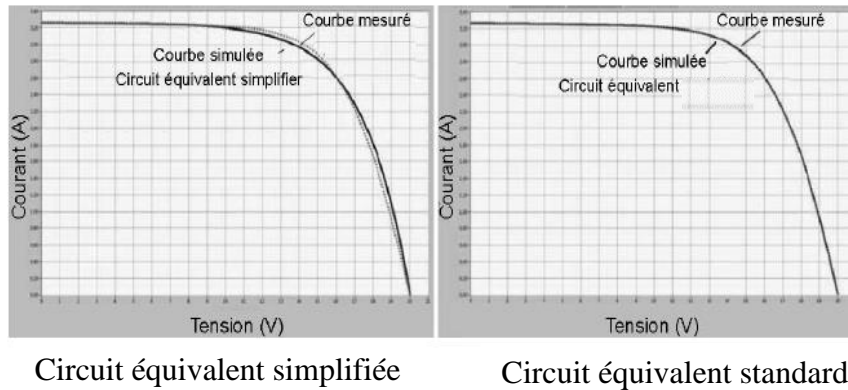


Figure I-9 Courbe I-V simulée d'un module solaire : Le circuit équivalent simplifié[31].

Il faut noter que par rapport au modèle simplifié, la qualité du circuit équivalent standard est la meilleure.

La détermination les deux résistances R_s et R_{sh} se fait à partir du gradient de la courbe (I-V) aux voisinages des points du court-circuit et du circuit ouvert.

I.5.4.1 Le point du court-circuit :

Dans ce cas, on a un maximum de courant photonique I_{ph} qui circule à l'extérieur de la cellule. On peut négliger le courant à travers la diode D. L'équation I.8 deviendra ainsi :

$$I = I_{ph} - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (I. 19)$$

Après la dérivation on obtient :

$$\frac{dI}{dV} = 0 - \frac{1}{R_{sh}} - \frac{R_s}{R_{sh}} \frac{dI}{dV} = - \frac{1}{R_{sh} + R_s} \quad (I. 20)$$

En général, on néglige la résistance R_s devant la valeur de R_{sh} , on obtient :

$$R_{sh} = \frac{dV}{dI} |_{V=0} \quad (I. 21)$$

I.5.4.2 Le point du circuit ouvert :

Dans ce cas, on néglige le courant I_D devant le courant I_{sc} car la tension de la diode V_D devient assez grande. Ainsi l'équation I.08 devient comme suit :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V+I.R_s}{mV_T}} - 1 \right) \quad (I.22)$$

On dérive l'équation I.22 par rapport à la variable du courant I de la cellule PV, on obtient :

$$\frac{d(I)}{dI} = 1 = 0 - I_s \frac{1}{m V_T} \left[\frac{dV}{dI} + R_s \right] e^{\frac{V+I.R_s}{mV_T}} \quad (I.23)$$

Après le calcul, on obtient :

$$\frac{dV}{dI} = -R_s - \frac{m V_T}{I_s} e^{\frac{V+I.R_s}{mV_T}} \quad (I.24)$$

En appliquant les conditions du point de court-circuit, $V=V_{oc}$ et $I=0$, on aura :

$$\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=V_{oc}} = R_s + \frac{m V_T}{I_s} e^{\frac{V+I.R_s}{mV_T}} \approx R_s \quad (I.25)$$

Il faut noter que dans l'équation I.25, on a négligé le terme de la résistance de la diode en mode direct au voisinage du courant I_{sc} devant la résistance R_s .

La figure I-10 présente la détermination des résistances série et shunt d'une cellule photovoltaïque à partir de la courbe caractéristique en circuit ouvert et court-circuit respectivement.

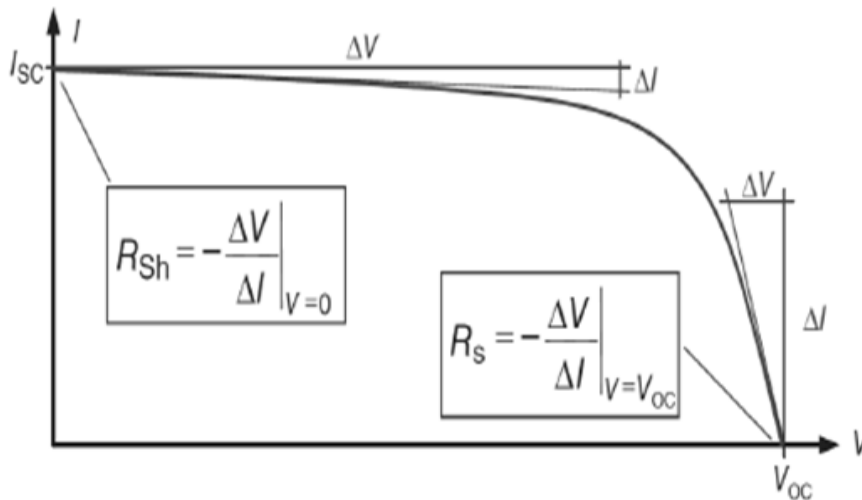


Figure I-10 Détermination des résistances série et shunt d'une cellule PV

I.6 Propriétés des panneaux solaires :

Les caractéristiques des modules solaires tels que le coefficient de température, le rendement sont principalement déterminées par les cellules photovoltaïques qui les composent. Le type d'interconnexion des cellules influe sur ces caractéristiques. La mise en série et où en parallèle de ces cellules ont des effets différents spécialement en présence des défauts d'ombrage [9].

I.6.1 Connexion de cellules solaires en parallèle

Dans la figure I.11, nous représentons trois cellules solaires connectées en parallèle. Ce type de raccordement se caractérise par la même tension dans toutes les cellules et la sommation des courants individuels. On a la formule I.18 :

$$\begin{cases} V = V_1 = V_2 = V_3 \\ I = I_1 + I_2 + I_3 \end{cases} \quad (\text{I. 26})$$

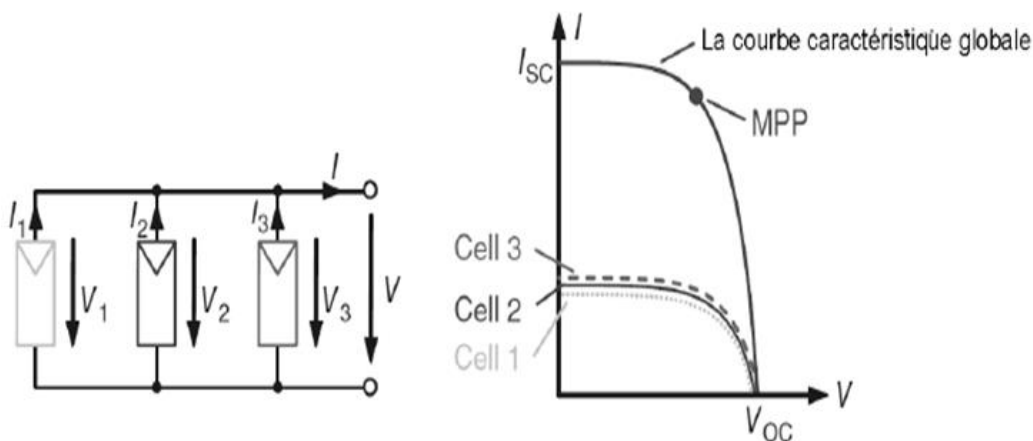


Figure I-11 Fonctionnement des cellules solaires en parallèle

Il faut noter qu'en fonctionnement normal, comme illustré dans la figure I-11, la caractéristique I-V globale est obtenue après l'addition des trois courants relatifs aux cellules individuelles pour la même tension. Cependant si par défaut une cellule est ombrée à trois quart de sa surface efficace, nous pouvons dire que sa tension en circuit ouvert est légèrement affectée alors que son courant de court-circuit se dégrade environ trois quart par rapport à sa valeur sans défaut. La figure I-12 illustre l'effet d'ombrage sur la courbe caractéristique d'un module PV.

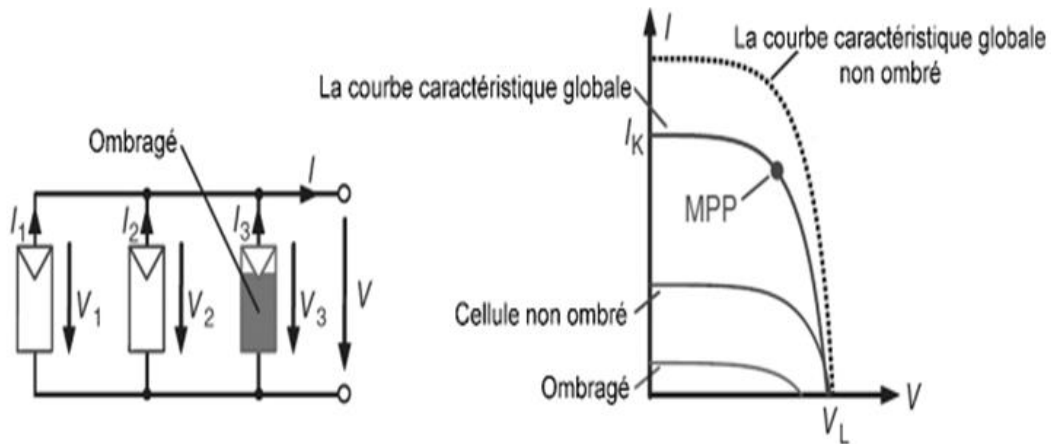


Figure I-12 Ombrage de l'une des trois cellules PV

On peut dire que la connexion en parallèle des modules PV réagit d'une manière naturelle à l'ombrage partiel.

I.6.2 Branchement en série de cellules solaires

Dans un panneau solaire, plusieurs cellules PV sont connectées en série afin d'obtenir des tensions décentes. Dans la figure I-13, on présente un mini module PV composé de trois cellules PV connectées en série. En absence de défaut, le courant dans les trois cellules PV est identique et la tension globale du mini-panneau est la somme des tensions individuelles de toutes les cellules connectées en série[11][12]. Donc on peut écrire :

$$\begin{cases} V = V_1 + V_2 + V_3 \\ I = I_1 = I_2 = I_3 \end{cases} \quad (I.27)$$

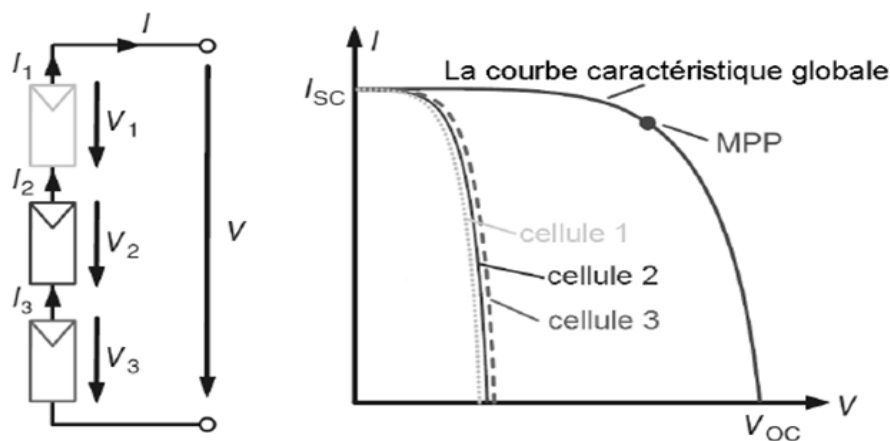


Figure I-13 Connexion des cellules PV en série

Dans cette configuration, la courbe caractéristique globale du panneau PV, (I-V) est obtenue par l'addition des différentes tensions pour les valeurs fixes de courants.

Pour traiter l'aspect ombrage dans ce cas, on suppose que les trois cellules identiques sont connectées en série avec trois quarts de la surface efficace de l'une entre-elles est ombrée comme s'est indiqué dans la figure I-14.

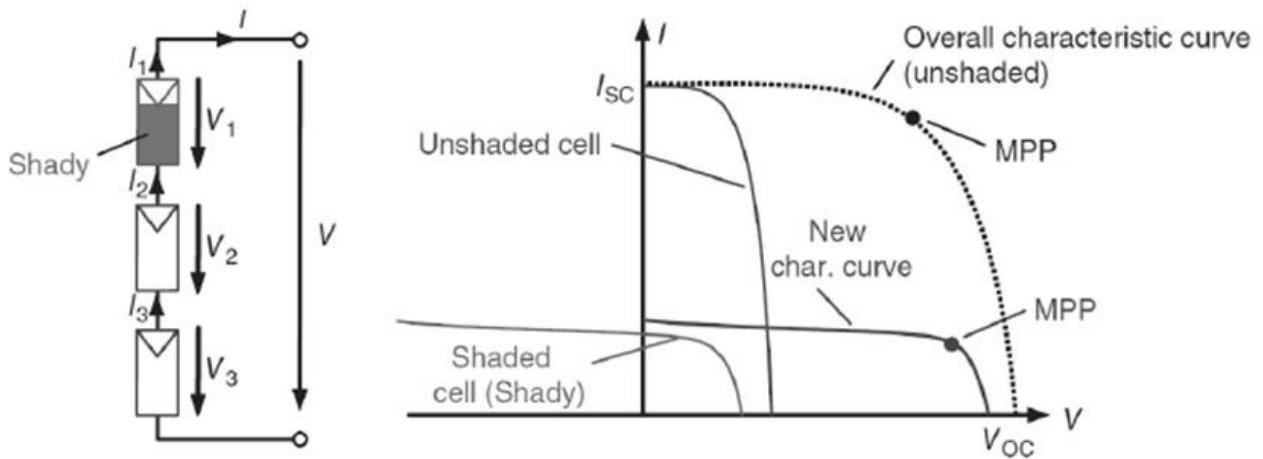


Figure I-14 Ombrage partiel d'une cellule PV insérée dans une rangée en série

On constate la puissance du MPP du module a été réduite de près des trois quarts par rapport à la situation sans ombrage, bien que seulement une seule cellule a été ombragée à les trois- quarts de sa surface efficace.

I.7 Protections des GPV

Pour éviter les pannes destructrices liées à l'association des cellules lors d'une installation des panneaux photovoltaïques en cas d'ombrage, deux types de protections sont intégrés dans les Systèmes[10] :

- La protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour). Elle est nécessaire quand la charge du module PV est une batterie.
- La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) afin d'éviter les points chauds.

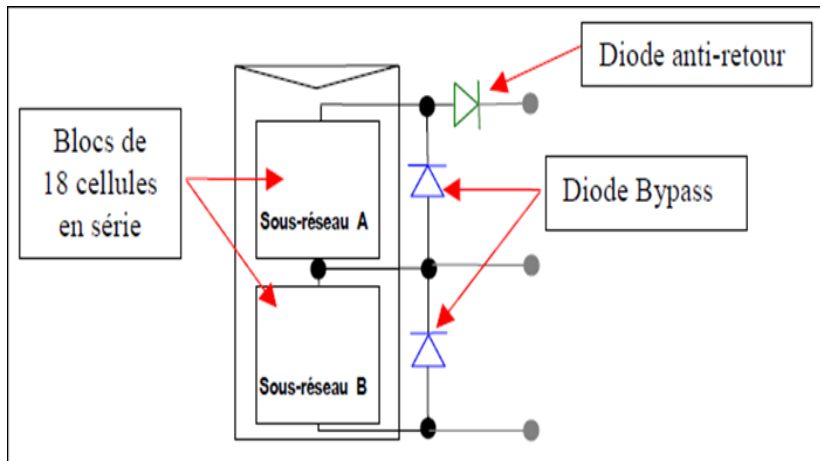


Figure I-15 Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.

I.8 Simulation de la caractéristique électrique du panneau PV

La figure I-16 montre le schéma bloc du panneau PV sous Simulink sur la base du modèle mathématique précédant de la cellule photovoltaïque, pour une irradiation et une température donnée.

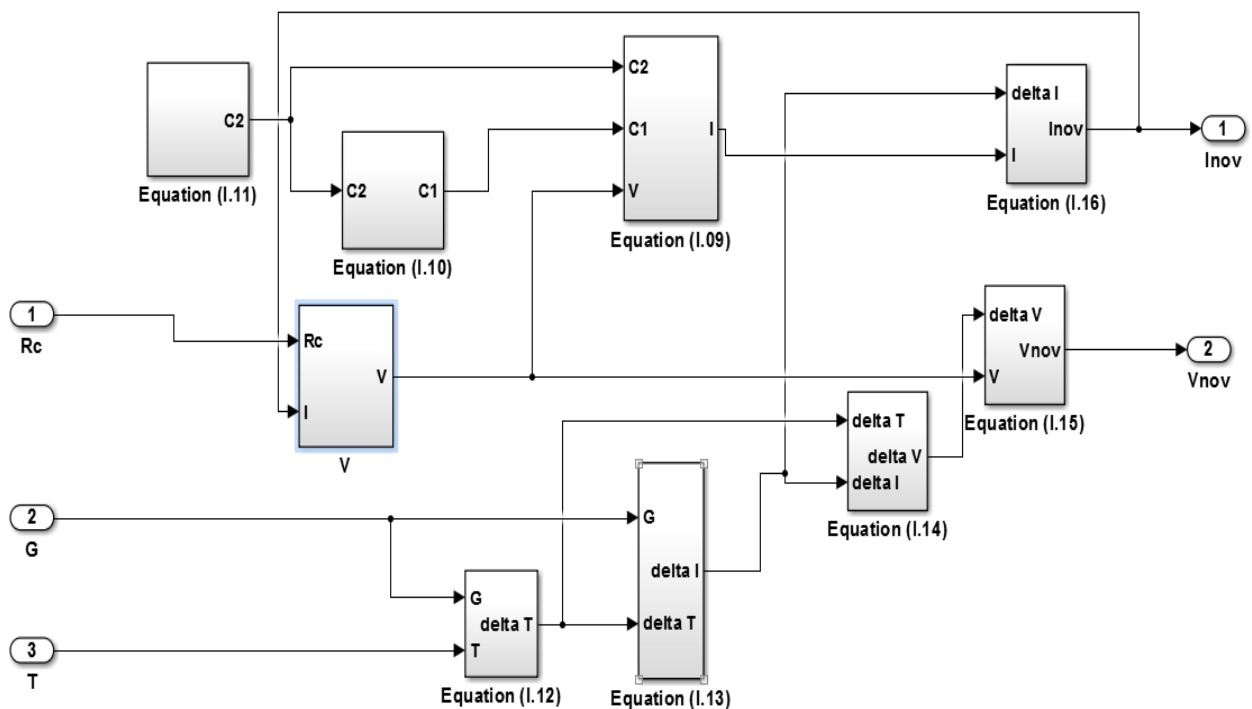


Figure I-16 Schéma bloc du panneau PV sous Simulink

La figure I-17 représente la caractéristique I-V obtenue par simulation sur l'environnement MATLAB-SIMULINK du modèle mathématique d'un panneau solaire ayant les paramètres donnés dans l'annexe 1. On remarque bien qu'elle est de forme similaire à celle de la figure I.3. Le courant de court-circuit $I_{sc} = 5.4A$ et la tension du circuit ouvert $V_{oc} = 45.9V$

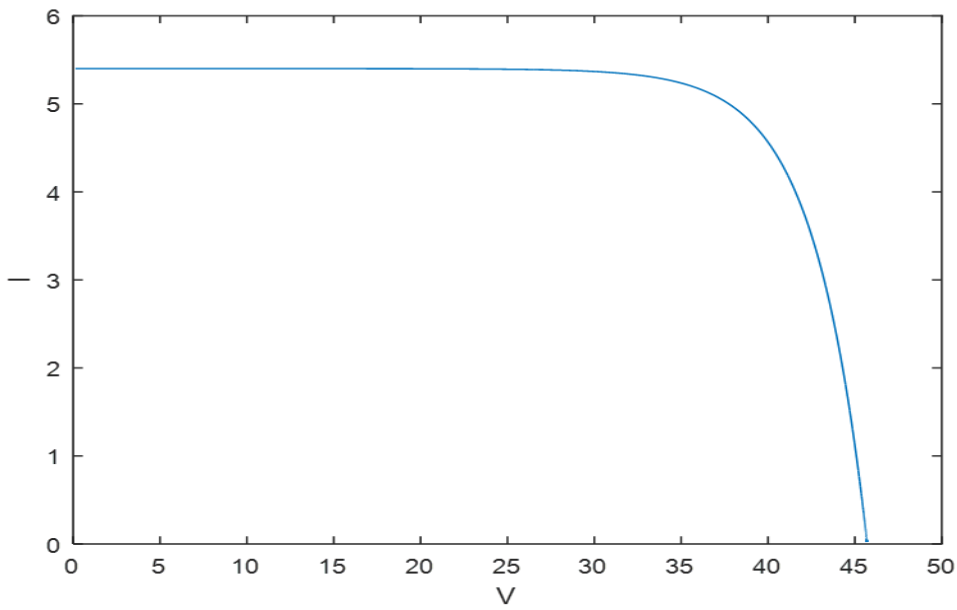


Figure I-17 La caractéristique (I-V) du GPV avec $E=900W/m^2$, $T=25^{\circ}C$

Les deux figures suivantes montrent la caractéristique de la puissance du même panneau solaire alimentant une charge résistive variable en fonction de la tension aux bornes de du panneau (figure I-18) et en fonction du courant débité par le panneau (figure I-19). Il est clair que la courbe de la puissance du panneau solaire présente un maximum qu'on doit l'exploiter pour maximiser le rendement du panneau.

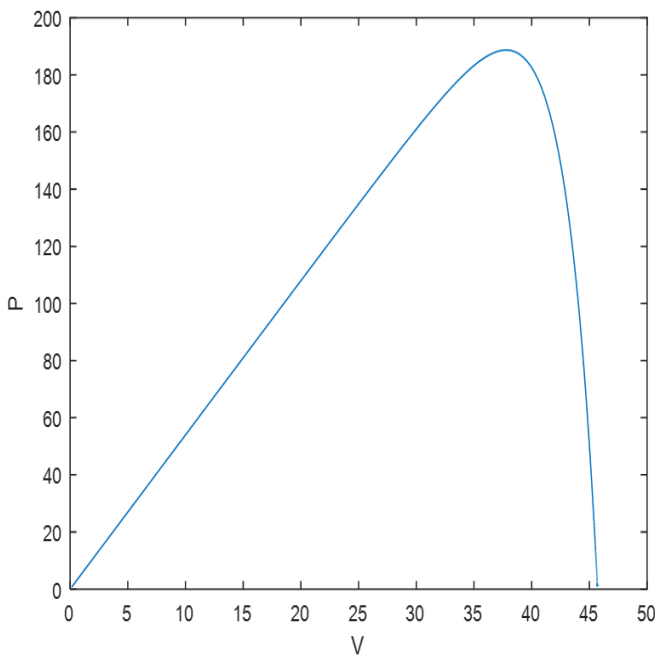


Figure I-18 La caractéristique (P-V) du GPV

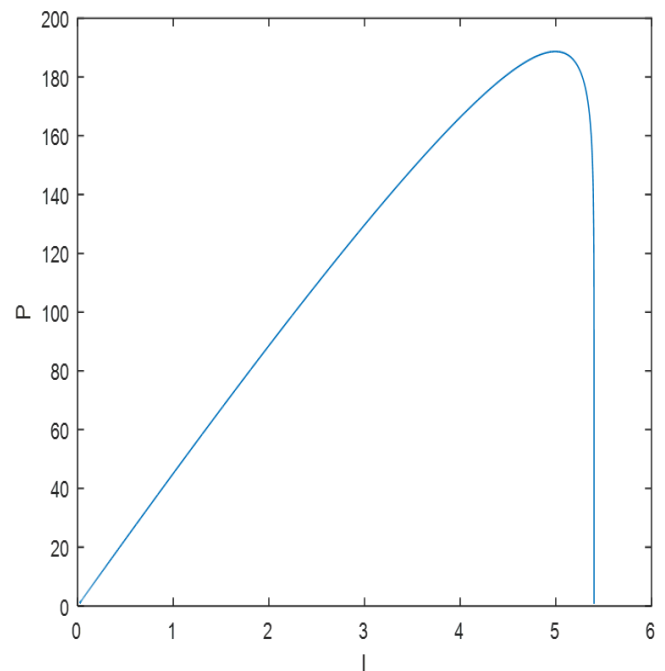


Figure I-19 La caractéristique (P-I) du

Les figures suivantes montrent la caractéristique I-V du panneau solaire en variant les valeurs de l'éclairement et de la température respectivement.

Sous $E=900\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$: Le courant de court-circuit $I_{sc} = 5.4\text{A}$ et la tension du circuit ouvert $V_{oc} = 45.7\text{V}$

Sous $E=600\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$: Le courant de court-circuit $I_{sc} = 3.6\text{A}$ et la tension du circuit ouvert $V_{oc} = 44.8\text{V}$

Sous $E=900\text{W}/\text{m}^2$ et $T=35^\circ\text{C}$: Le courant de court-circuit $I_{sc} = 5.4\text{A}$ et la tension du circuit ouvert $V_{oc} = 43.92\text{V}$

On constate bien que l'aire de la caractéristique est affecté dans les deux cas et par conséquent, le facteur de forme et le rendement seront affecté.

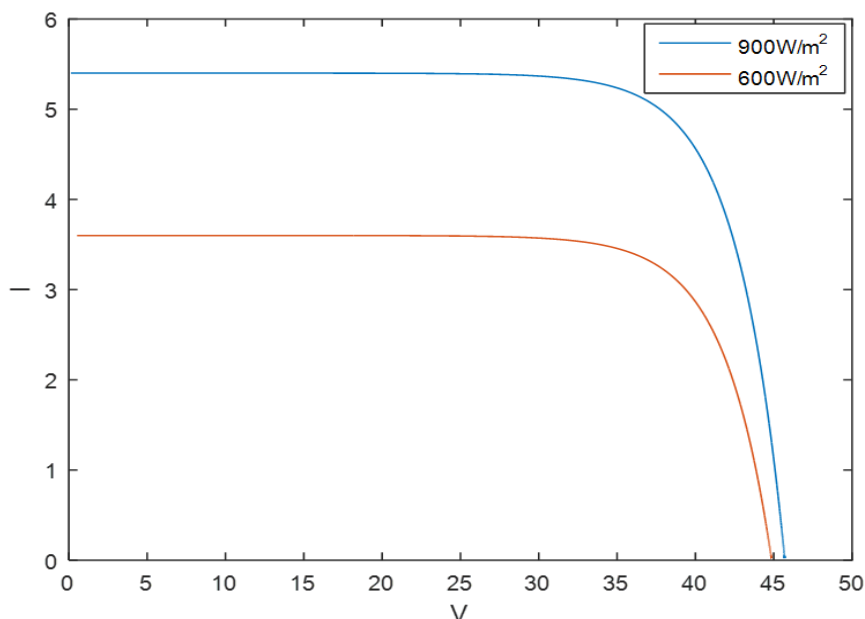


Figure I-20 : Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V

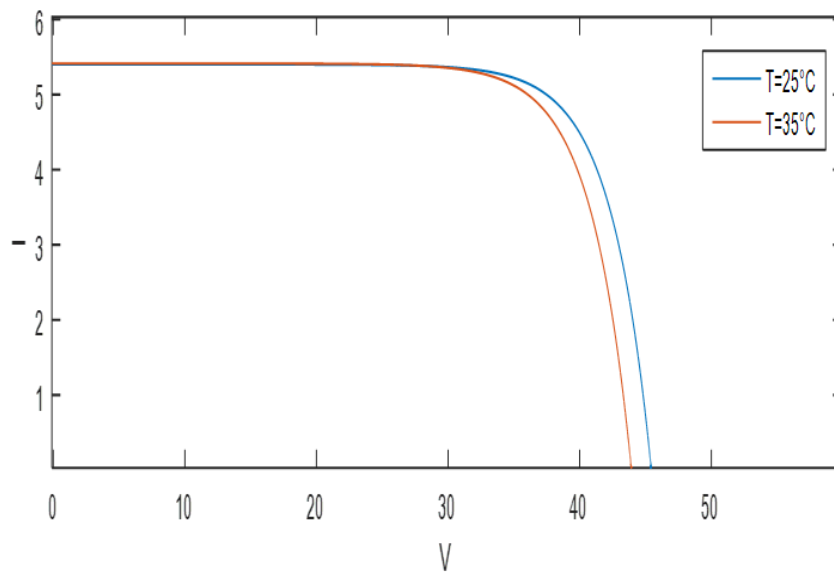


Figure I-21 Effet de la température sur la caractéristique I-V.

I.9 Techniques de la MPPT

Pour assurer le fonctionnement d'un générateur PV à son point de puissance maximale (PPM), des commandes sont développés pour suivre le point de puissance maximale sous le nom MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Plusieurs algorithmes ont été proposés pour la réalisation de la commande MPPT [11-12-13].

I.9.1 Algorithme de perturbation et observation

L'algorithme P & O de la commande MPPT est le plus utilisé dans la pratique en raison de sa simplicité et de sa facilité d'implémentation. Il consiste à perturber la tension de fonctionnement du module PV par un petit incrément et d'observer le changement de puissance ΔP résultant. Si la puissance absorbée par le générateur PV augmente ($\Delta P > 0$), cela veut dire que le point de fonctionnement s'est déplacé vers le PPM et par conséquent la tension doit être perturbée dans la même direction. Sinon, si la puissance absorbée par le générateur photovoltaïque diminue ($\Delta P < 0$), le point de fonctionnement s'est éloigné du PPM et la direction de la perturbation doit être inversée pour revenir au PPM. La figure (I-23) montre l'organigramme de cet algorithme.

Le défaut de cet algorithme est leur pas fixe, qui provoque une oscillation autour du point optimal, et qui cause des pertes d'une certaine quantité d'énergie disponible. [12]

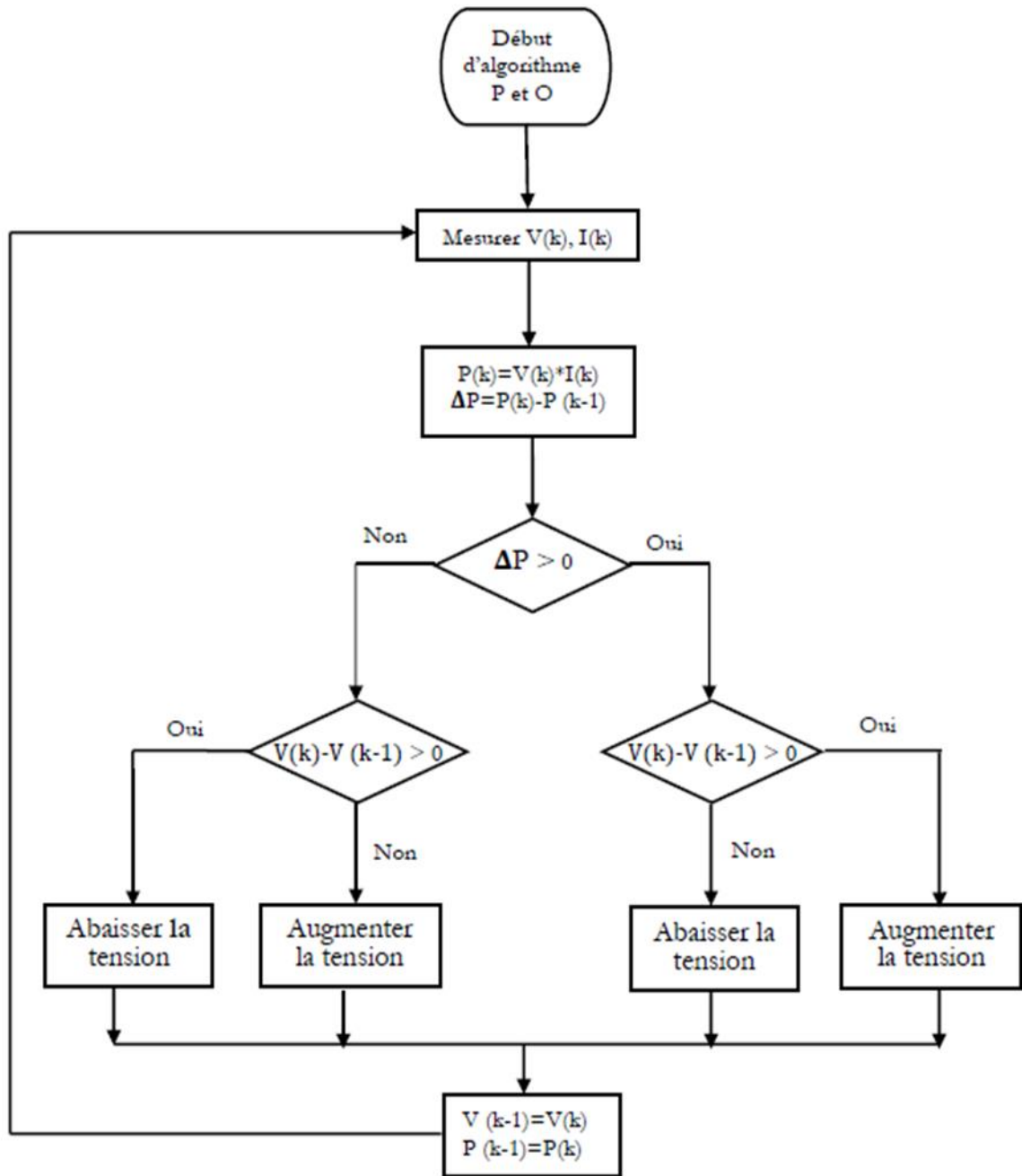


Figure I-22 Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode (P & O).

La figure I-23 montre la courbe (P-V) d'un module PV à éclairement et température constants de notre panneau en appliquant l'Algorithme de perturbation et observation.

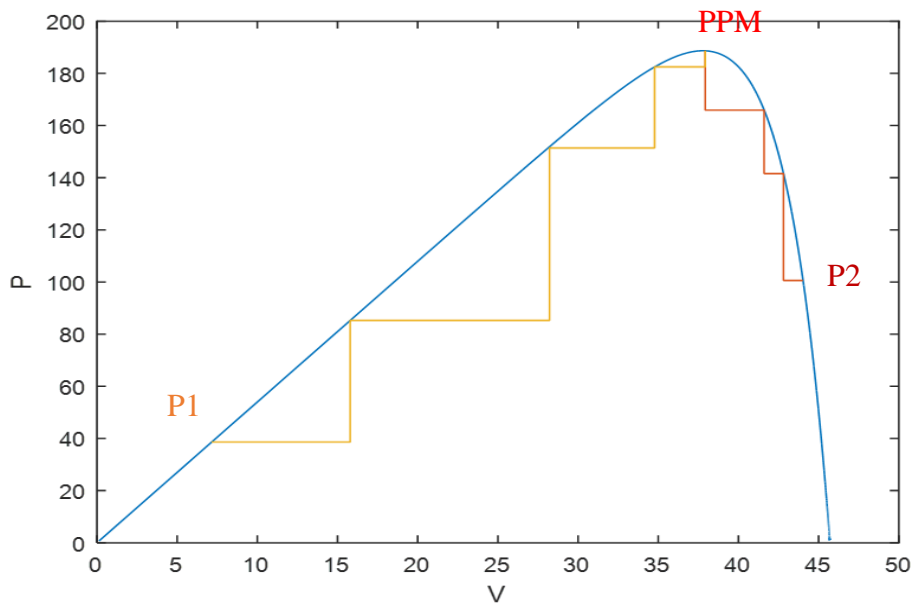


Figure I-23 recherche du PPM par la méthode (P & O).

I.10 Conclusions

Les panneaux solaires convertissent directement l'énergie solaire qui est propre, n'émet aucun gaz à effet de serre, inépuisable et disponible partout dans le monde, en courant électrique continu. La puissance réellement délivrée par un panneau varie en fonction de la situation géographique, la position du soleil (puissance maximum au zénith) et la température du panneau. Vu que la puissance du panneau varie fortement en fonction de la charge et l'intermittence de la source primaire, le panneau ne peut être jamais utilisé seul pour assurer un approvisionnement en électricité. On parle alors des systèmes solaires photovoltaïques.

CHAPITRE II. SYSTEMES

SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES

DE POMPAGE

II.1 Introduction

Le problème de la demande d'eau dans nos jours est très important, en particulier dans les zones rurales et les sites isolés où l'accès à l'énergie électrique classique est difficile. Une nouvelle solution pratique et économique est introduite qui utilise l'énergie solaire photovoltaïque pour le pompage de l'eau.

Un système photovoltaïque devient intéressant lorsqu'il est **facile à installer**, avec **une autonomie acceptable** et une **excellente fiabilité** de service.

En Algérie, Les eaux souterraines sont évaluées à 1.8 milliards de m^3 dans le Nord et les potentialités du Sahara algérien qui occupe plus de 80 % de la surface totale du pays, sont estimées à 1 60000 milliards de m^3 . Ces dernières sont difficilement exploitables et renouvelables ; et 4 à 5 milliards de m^3 sont exploitables annuellement. Donc la bonne solution pour ces régions c'est le pompage d'eau par l'énergie solaire photovoltaïque. [14]

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu sur le système solaire photovoltaïque de pompage. Ensuite, nous présentons une modélisation de chaque élément du système de pompage.

II.2 Constitution d'un système de pompage solaire

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

Dans notre travail le système de pompage photovoltaïque est constitué de (voir Figure (II.1)):

- Des panneaux solaires photovoltaïques qui convertissent les rayonnements solaires en énergie électrique, interconnectés électriquement pour constituer une unité de production de courant continu.
- Une unité de commande et contrôle de puissance, constituée d'un régulateur de charge, d'une batterie et un convertisseur(onduleur), capable d'assurer des tensions à amplitudes et fréquences réglables en fonction de la puissance disponible du générateur solaire.

- Un groupe électropompe immergé, constitué d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge.
- Un câblage électrique, par lequel transitent l'énergie du générateur au moteur, et les informations relatives aux contrôles de sécurité.
- Une infrastructure hydraulique qui conduit l'eau du puits, jusqu'aux points de distribution.

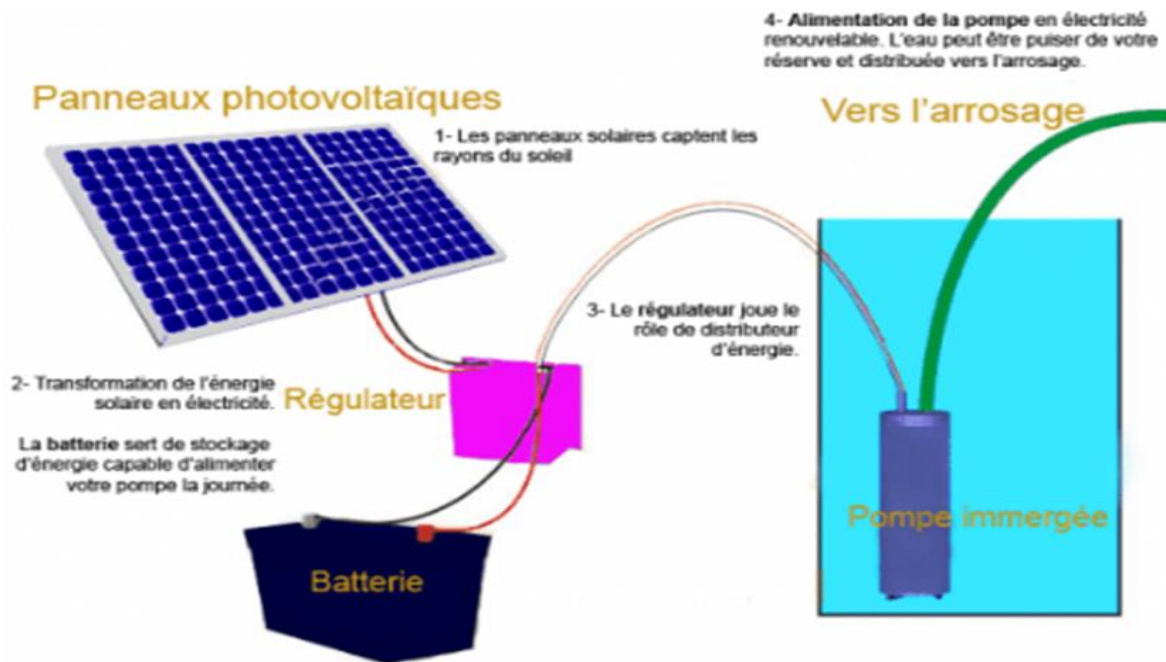


Figure II-1 Schéma synoptique simplifié de Pompage photovoltaïque avec stockage

II.3 Modélisation de chaque élément du système

II.3.1 Régulateur de charge solaire

Le régulateur photovoltaïque sert à contrôler la puissance de panneaux solaires raccordée et garantir un entretien optimal de la batterie. C'est un dispositif destiné à la protection contre les surcharges, les décharges profondes, une polarité inversée des panneaux solaires et contre la sur- température et surcharge. [27]

II.3.2 Modélisation du convertisseur DC-AC

L'onduleur est un convertisseur triphasé capable de convertir une puissance continue en puissance alternative, Elle permet d'imposer à la machine asynchrone des ondes de tensions à amplitudes et fréquences réglables à partir d'une source de tension continue. Elle constitués des

interrupteurs électroniques en pont commandées par la technique modulation de largeur d'impulsion(MLI). [15][28][29]

La figure (II.3) montre le schéma d'un onduleur triphasé alimentant la MAS.

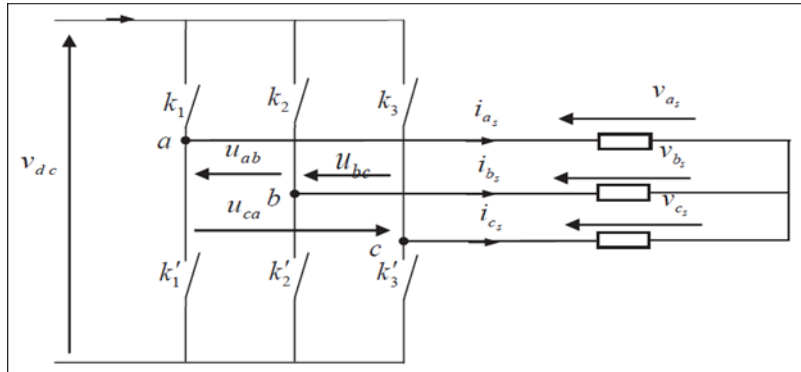


Figure II-2 Schéma de l'onduleur triphasé.

II.3.2.1 Mise en équations

Les états des interrupteurs sont modélisés par la fonction logique suivante

$$C_i = \begin{cases} 1 & \text{si } K_i \text{ conduit et } K'_i \text{ bloqué} \\ 0 & \text{si } K_i \text{ bloqué et } K'_i \text{ conduit} \end{cases} \quad (\text{II. 1})$$

Avec $i = a, b, c$ On suppose que la commutation des interrupteurs K_i est instantanée et la chute de tension est négligeable. Donc pour les tensions de ligne on a :

$$U_{ab} = V_{as} - V_{bs} = V_{dc}(C_1 - C_2) \quad (\text{II. 2})$$

$$U_{bc} = V_{bs} - V_{cs} = V_{dc}(C_2 - C_3) \quad (\text{II. 3})$$

$$U_{ca} = V_{cs} - V_{as} = V_{dc}(C_3 - C_1) \quad (\text{II. 4})$$

On fait la soustraction de (II. 2)- (II. 4) et (II. 2)- (II. 3) et (II. 3)- (II. 4), Sachant que le système de charge est équilibré, donc la somme des tension simples est nulle : $V_{as} + V_{bs} + V_{cs} = 0$

On trouve les équations suivants :

$$V_{as} = \frac{V_{dc}}{3} (2C_1 - C_2 - C_3) \quad (\text{II. 5})$$

$$V_{bs} = \frac{V_{dc}}{3} (2C_2 - C_1 - C_3) \quad (\text{II. 6})$$

$$V_{cs} = \frac{V_{dc}}{3} (2C_3 - C_1 - C_2) \quad (\text{II. 7})$$

Les tensions de phases peuvent être exprimée comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 8})$$

Il suffit d'appliquer la transformation de Park pour passer d'un système triphasé au système biphasé.

II.3.2.2 Choix des interrupteurs

L'interrupteur électronique (K) peut être un transistor de puissance MOSFET (Metal Oxide Semi conductor Field Effect Transistor) qui présente de très bonnes caractéristiques pour les applications à fréquence élevée et le mieux adapté aux basses tensions et il est limité par ses pertes en conduction, ou un thyristor (GTO, BJT) qui bien adaptés aux très hautes tensions et très fortes puissances, ou un transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) qui bien adaptés aux moyennes et hautes tensions et elle posséder des temps de commutation beaucoup plus courts par rapport aux GTO. [16] [17]

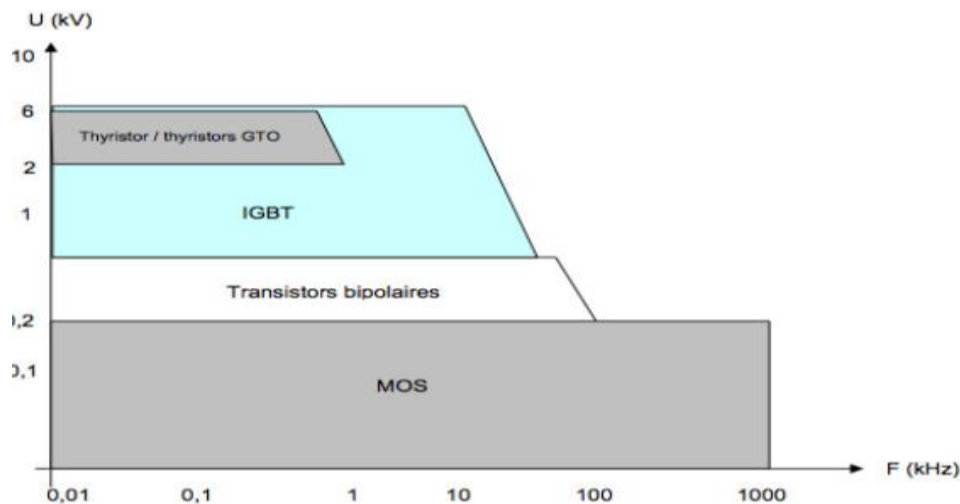


Figure II-3 Représentation de l'utilisation des interrupteurs.

II.3.3 Modélisation de la pompe centrifuge

Les pompes sont des machines permettant d'aspirer et de refouler un fluide pour produire une différence de pression au moyen de l'organe actif (piston, roue, etc.). Elle alimentée par le moteur qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique. Cette énergie est retransmise au fluide sous forme de débit (énergie cinétique) et de pression (énergie potentielle). [18]

II.3.3.1 Principe de fonctionnement et constitution

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau arrivant est dirigé vers la roue en rotation qui sous l'effet de la force centrifuge lui communique de l'énergie cinétique. Cette énergie cinétique est transformée en énergie de pression dans la volute.

On définit la hauteur manométrique totale HMT d'une pompe qui est le travail mécanique utile fourni au fluide refoulé par unité de poids. La pompe centrifuge conçue pour une HMT relativement fixe.[4]

Elles sont essentiellement constituées de :

- Une roue à aubes tournant autour de son axe
- Un distributeur dans l'axe de la roue
- D'un corps de pompe
- Tubulure d'aspiration
- Tubulure de refoulement
- Arbre et chemises
- Collecteur à volute
- Anneaux d'usure

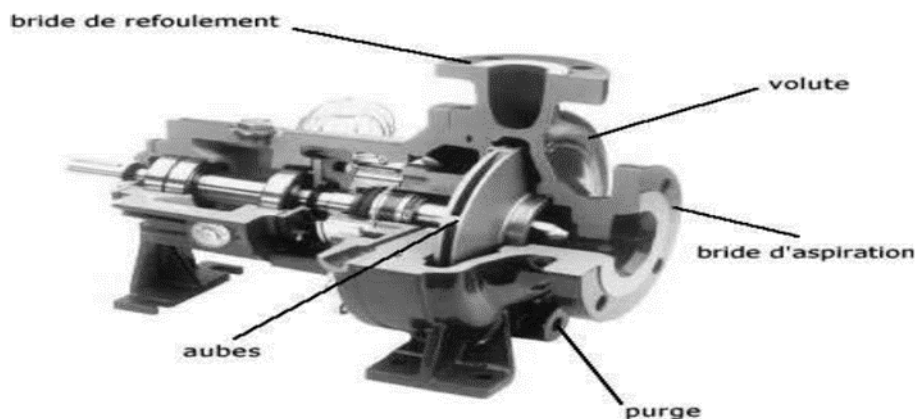


Figure II-4 Pompe (vue ouverte).

II.3.3.2 Hauteur totale de pompage

La hauteur totale du pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique.

$$H = H_s + H_d \quad (\text{II. 9})$$

Avec H : Hauteur totale du pompage. H_s : hauteur statique ou la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au point le plus élevé auquel l'eau doit être pompée. Et H_d : somme des pertes linéaires et des pertes singulières.

II.3.3.3 Pertes de charge linéaires

Les pertes linéaires sont des pertes d'eau dans la tuyauterie est donnée par la formule suivante [19] :

$$\Delta H_l = \lambda \frac{L v^2}{d 2g} = \lambda \frac{L 8Q^2}{d d^4 \pi^2 g} \quad (\text{II. 10})$$

Avec :

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{d^2 \pi} \quad (\text{II. 11})$$

λ : Coefficient de pertes de charges linéaires.

d :Diamètre de la tuyauterie (m).

L : Longueur de la tuyauterie (m).

g : Accélération de la pesanteur (m/s^2).

v : Vitesse moyenne du fluide (m/s) .

Q :Débit(m^3/s).

II.3.3.4 Pertes de charge singulières(locales)

Les pertes singulières sont dues aux divers changements de section est donnée par l'expression suivante : [19]

$$\Delta H_s = \xi \frac{v^2}{2g} = \xi \frac{8Q^2}{d^4 \pi^2 g} \quad (\text{II. 12})$$

Avec

ξ :coefficient de pertes des charges locales.

La hauteur dynamique est la somme des pertes linéaires et des pertes singulières

$$H_d = \Delta H_l + \Delta H_s = \frac{8}{gd^4 \pi^2} \left(\lambda \frac{L}{d} + \xi \right) Q^2 = K_{fr} Q^2 \quad (\text{II. 13})$$

Avec K_{fr} constante de canalisation.

La hauteur totale de pompage est : $H = H_s + K_{fr}Q^2$

II.3.3.5 La caractéristique « Débit-Hauteur » de la pompe

Le modèle utilisé est identifié par l'expression de la hauteur manométrique totale qui est donnée par le modèle de « PELEIDER-PETERMAN » : [20]

$$\text{HMT} = K_0\Omega^2 + K_1\Omega Q - K_2Q^2 \quad (\text{II. 14})$$

Avec K_0 , K_1 et K_2 sont des constantes propres de la pompe liées à sa géométrie et qui sont donnés par le constructeur.

Q : débit volumique [m^3/s].

Hmt : hauteur manométrique totale [m] et Ω : vitesse [rd/s].

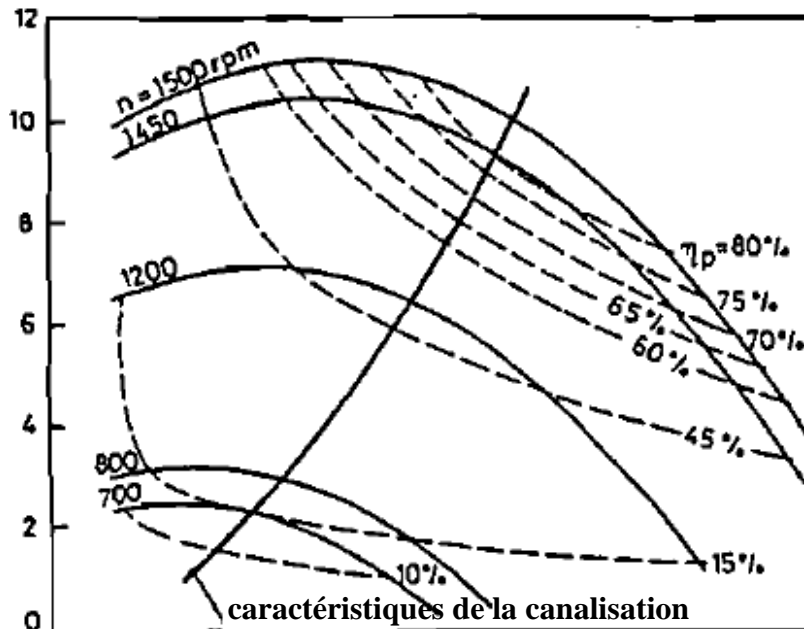


Figure II-5 Caractéristiques « HMT – Débit » d'une pompe centrifuge

Le point de fonctionnement de la pompe est l'intersection de ces deux caractéristiques ou la hauteur manométrique de la pompe sera égale à la somme de la hauteur géométrique totale et les pertes de charge totale dans les conduites. Donc le point de fonctionnement dépend des caractéristiques de la canalisation d'une pompe indiquée. Par conséquent une bonne conception et une tuyauterie de bon choix donnent de bons résultats dans le système de pompage.

II.3.3.6 La caractéristique « Couple-Vitesse » de la pompe

La pompe centrifuge applique un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse de rotation du moteur. [21]

$$T_r = K_r \Omega^2 \quad (\text{II. 15})$$

Où

K_r : le coefficient de proportionnalité [$\text{Nm}/(\text{rad. s}^{-1})^2$]

Ω : la vitesse angulaire de la machine [rad. s^{-1}]

Avec :

$$K_r = \frac{P_{mec}}{\Omega^3} \quad (\text{II. 16})$$

II.3.3.7 Calcul de puissance

La pompe fournit de l'énergie au fluide en vue de son déplacement d'un point à un autre. La puissance utile hydraulique fournie par la pompe est exprimée par :

$$P_H = \rho g Q \text{HMT} \quad (\text{II. 17})$$

Avec ρ : masse volumique, en kg/m^3 ,

Q : débit refoulé, en m^3/s ,

g : accélération de la pesanteur = $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$,

HMT : hauteur manométrique totale, en m.

La puissance absorbée sur l'arbre de la pompe est donnée par la formule :

$$P_{ab} = \frac{P_H}{\eta_p} \quad (\text{II. 18})$$

Avec η_p : Le rendement de la pompe

La puissance nécessaire mécanique délivré par le moteur est supérieure à la puissance absorbée par la pompe, compte tenu les pertes d'accouplement entre le moteur et la pompe centrifuge.

II.3.3.8 Les lois de similitude

Pour une pompe centrifuge, ces performances (Q , H et P) sont connues à une vitesse Ω , les lois de similitude permettent de déterminer les performances (Q' , H' et P') pour une vitesse Ω' en utilisant les relations suivantes[20]:

Débit :

$$Q' = Q \frac{\Omega'}{\Omega} \quad (\text{II. 19})$$

La hauteur manométrique totale :

$$H' = H \left(\frac{\Omega'}{\Omega} \right)^2 \quad (\text{II. 20})$$

La puissance du moteur :

$$P' = P \left(\frac{\Omega'}{\Omega} \right)^3 \quad (\text{II. 21})$$

II.3.4 Modélisation du Moteur Asynchrone

Le moteur convertit l'énergie électrique en énergie mécanique pour fournir la puissance nécessaire au pompage.

Les moteurs alternatifs asynchrones sont les plus employés pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts parce qu'il présente l'avantage d'être robuste, faible coût, de construction simple et facilité d'entretien. Mais elle est de mauvais rendement aux faibles débits

II.3.4.1 Les hypothèses simplificatrices

Le comportement du moteur asynchrone est décrit par un système dynamique non linéaire. Pour établir un modèle mathématique en tenant compte les hypothèses simplificatrices suivantes : [22]

- Répartition sinusoïdale du flux dans l'entrefer.
- Le circuit magnétique n'est pas saturé et a une perméabilité constante.
- On néglige les pertes fer par hystérésis et courants de FOUCAULT, l'effet de peau.
- Les effets des encoches sont négligés.

Dans le but de simplifier la modélisation de la machine asynchrone, l'étude théorique est menée sur une machine bipolaire. Les résultats sont transposables pour une machine multipolaire à condition de multiplier le couple et de diviser la vitesse par p.

II.3.4.2 Modèle mathématique triphasé

Les enroulements statoriques et rotoriques représentés sur la Figure (II.10). Les phases rotoriques sont court-circuitées et décalé de l'angle électrique θ par rapport à les phases statoriques. [23]

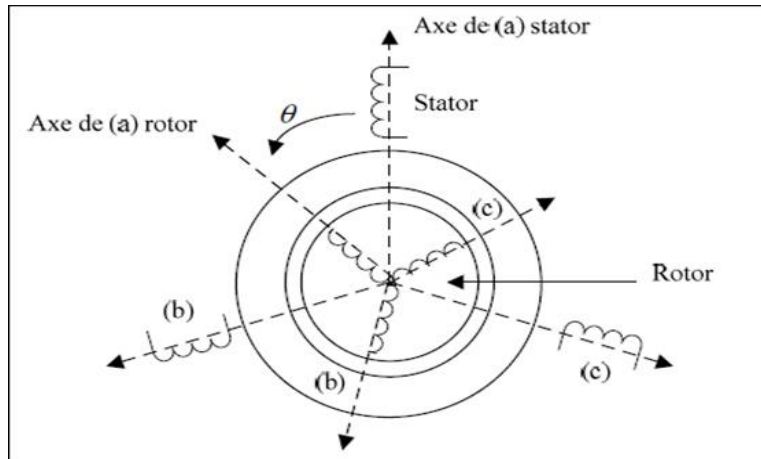


Figure II-6 Représentation des enroulements statoriques et rotoriques.

II.3.4.2.1 Équations électriques

Par l'application de la loi des mailles à chaque enroulement les expressions électriques de la machine sont définies comme suit [22] :

Au stator :

$$\begin{cases} v_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d \varphi_{sa}}{dt} \\ v_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d \varphi_{sb}}{dt} \\ v_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d \varphi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (II. 22)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} v_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d \varphi_{ra}}{dt} = 0 \\ v_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d \varphi_{rb}}{dt} = 0 \\ v_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d \varphi_{rc}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (II. 23)$$

Pour l'écriture matricielle, on met :

$$[v_{sabc}] = R_s [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sabc}] \quad (II. 24)$$

$$[v_{rabc}] = R_r [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{rabc}] = 0 \quad (II. 25)$$

Avec : R_s, R_r est les résistances du stator du rotor respectivement.

$[v_{sabc}]$ et $[v_{rabc}]$ les tensions simples d'alimentation du stator et du rotor respectivement

$[i_{sabc}]$ et $[i_{rabc}]$ les courants du stator et du rotor respectivement.

II.3.4.2.2 Équations magnétiques

Les expressions des flux statoriques et rotoriques dans le repère a, b, c s'écrit :

Au stator :

$$\begin{cases} \varphi_{sa} = l_s i_{sa} + M_s i_{sb} + M_s i_{sc} + M_{rasa} i_{ra} + M_{rbsa} i_{rb} + M_{rcsa} i_{rc} \\ \varphi_{sb} = l_s i_{sb} + M_s i_a + M_s i_c + M_{rasb} i_{ra} + M_{rbsb} i_{rb} + M_{rcsb} i_{rc} \\ \varphi_{sc} = l_s i_{sc} + M_s i_a + M_s i_b + M_{rasc} i_{ra} + M_{rbsc} i_{rb} + M_{rcsc} i_{rc} \end{cases} \quad (II. 26)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} \varphi_{ra} = l_r i_{ra} + M_r i_{rb} + M_r i_{rc} + M_{rasa} i_{sa} + M_{rasb} i_{sb} + M_{rasc} i_{sc} \\ \varphi_{rb} = l_r i_{rb} + M_r i_{ra} + M_r i_{rc} + M_{rbsa} i_{sa} + M_{rbsb} i_{sb} + M_{rbsc} i_{sc} \\ \varphi_{rc} = l_r i_{rc} + M_r i_{ra} + M_r i_{rb} + M_{rcsa} i_{sa} + M_{rcsb} i_{sb} + M_{rcsc} i_{sc} \end{cases} \quad (II. 27)$$

La matrice des flux réels s écrit :

$$[\varphi_{sabc}] = [L_s] [i_{sabc}] + [M_{sr}] [i_{rabc}] \quad (II. 28)$$

$$[\varphi_{rabc}] = [L_r] [i_{rabc}] + [M_{rs}] [i_{sabc}] \quad (II. 29)$$

Avec :

La matrice des inductances statoriques L_s :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (II. 30)$$

La matrice des inductances rotoriques L_r :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (II. 31)$$

Avec : l_s, l_r : les inductances propres du stator et du rotor respectivement.

M_s, M_r : les inductances mutuelles entre deux phases du stator et du rotor respectivement.

La matrice des inductances mutuelles entre le stator et le rotor s écrit :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (II. 32)$$

Le système est équilibré donc la somme des courants statoriques et rotoriques est nulle :

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (II. 33)$$

$$i_{ra} + i_{rb} + i_{rc} = 0 \quad (\text{II. 34})$$

Donc les équations du flux s écrit :

Au stator :

$$\begin{aligned} \varphi_{sa} &= L_s i_{sa} + M_{rasa} i_{ra} + M_{rbsa} i_{rb} + M_{rcsa} i_{rc} \\ \varphi_{sb} &= L_s i_{sb} + M_{rasb} i_{ra} + M_{rbsb} i_{rb} + M_{rcsb} i_{rc} \\ \varphi_{sc} &= L_s i_{sc} + M_{rasc} i_{ra} + M_{rbsc} i_{rb} + M_{rcsc} i_{rc} \end{aligned} \quad (\text{II. 35})$$

Au rotor :

$$\begin{aligned} \varphi_{ra} &= L_r i_{ra} + M_{rasa} i_{sa} + M_{rasb} i_{sb} + M_{rasc} i_{sc} \\ \varphi_{rb} &= L_r i_{rb} + M_{rbsa} i_{sa} + M_{rbsb} i_{sb} + M_{rbsc} i_{sc} \\ \varphi_{rc} &= L_r i_{rc} + M_{rcsa} i_{sa} + M_{rcsb} i_{sb} + M_{rcsc} i_{sc} \end{aligned} \quad (\text{II. 36})$$

Avec :

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique.

Pour l'écriture matricielle, on met :

$$[\varphi_{sabc}] = L_s [i_{sabc}] + [M_{sr}] [i_{rabc}] \quad (\text{II. 37})$$

$$[\varphi_{rabc}] = L_r [i_{rabc}] + [M_{rs}] [i_{sabc}] \quad (\text{II. 38})$$

II.3.4.2.3 Transformation triphasé/diphase

Le changement de repères triphasé/biphase est réalisé par la transformation de Park. Elle consiste à transformer le repère triphasé fixe (a, b, c) au stator et au rotor dans un repère biphase (d,q) pour réduit considérablement la complexité du modèle en vue de commande.

[22][24]

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = P(\mu) \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\mu) & \cos(\mu - 2\pi/3) & \cos(\mu - 4\pi/3) \\ -\sin(\mu) & -\sin(\mu - 2\pi/3) & -\sin(\mu - 4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 39})$$

Avec l'angle de transformation du repère statoriques $\mu = \theta_s$ ou rotorique $\mu = \theta_r$.

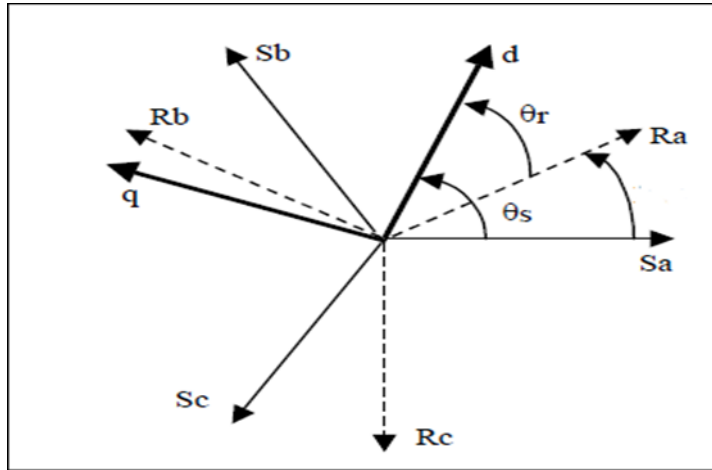


Figure II-7 Les différents systèmes d'axes utilisés.

La transformation inverse est donnée par :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = P(\mu)^T \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\mu) & -\sin(\mu) \\ \cos(\mu - 2\pi/3) & -\sin(\mu - 2\pi/3) \\ \cos(\mu - 4\pi/3) & -\sin(\mu - 4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (\text{II. 40})$$

En appliquant alors la transformation de Park aux équations statoriques et rotoriques de la machine asynchrone, nous obtenons [25]:

$$[v_{sabc}] = P(\theta_s)^T [v_{sdq}] = R_s P(\theta_s)^T [i_{sdq}] + \frac{d}{dt} [P(\theta_s)^T [\varphi_{sdq}]] \quad (\text{II. 41})$$

$$[v_{rabc}] = P(\theta_r)^T [v_{rdq}] = R_r P(\theta_r)^T [i_{rdq}] + \frac{d}{dt} [P(\theta_r)^T [\varphi_{rdq}]] \quad (\text{II. 42})$$

On multiplie par $P(\theta_s)$:

$$[v_{sdq}] = R_s [i_{sdq}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sdq}] + P(\theta_s) \frac{d}{dt} [P(\theta_s)^T] [\varphi_{sdq}] \quad (\text{II. 43})$$

$$[v_{rdq}] = R_r [i_{rdq}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{rdq}] + P(\theta_r) \frac{d}{dt} [P(\theta_r)^T] [\varphi_{rdq}] \quad (\text{II. 44})$$

Où :

$$P(\theta_s) \frac{d}{dt} [P(\theta_s)^T] = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 45})$$

On aboutit aux expressions suivantes dans le repère (d,q):

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d \varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} & \text{(II. 46)} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d \varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} & \text{(II. 47)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{rd} + \frac{d \varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} & \text{(II. 48)} \\ 0 = R_r i_{rq} + \frac{d \varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} & \text{(II. 49)} \end{cases}$$

Les flux statoriques et rotoriques s'expriment dans le repère de PARK par la relation suivante :

$$\begin{aligned} [\varphi_{sdq}] &= P(\theta_s) [\varphi_{sabc}] = P(\theta_s) [L_s [i_{sabc}] + [M_{sr}] [i_{rabc}]] \\ [\varphi_{rdq}] &= P(\theta_r) [\varphi_{rabc}] = P(\theta_r) [L_r [i_{rabc}] + [M_{rs}] [i_{sabc}]] \end{aligned} \quad \text{(II. 50)}$$

$$\begin{aligned} [\varphi_{sdq}] &= P(\theta_s) L_s P(\theta_s)^T [i_{sdq}] + P(\theta_s) [M_{sr}] P(\theta_s)^T [i_{rdq}] \\ [\varphi_{rdq}] &= P(\theta_r) L_r P(\theta_r)^T [i_{rdq}] + P(\theta_r) [M_{rs}] P(\theta_r)^T [i_{sdq}] \end{aligned} \quad \text{(II. 50)}$$

Donc les équations du flux s écrit :

$$\varphi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \quad \text{(II. 51)}$$

$$\varphi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \quad \text{(II. 52)}$$

$$\varphi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \quad \text{(II. 53)}$$

$$\varphi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \quad \text{(II. 54)}$$

Avec :M : Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

II.3.4.2.4 Équations mécanique

La puissance électrique instantanée fournie par le moteur asynchrone s'exprime dans le repère (d,q) par [26] :

$$P_e = v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq} \quad \text{(II. 55)}$$

$$P_e = R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) + \omega_s (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}) + \frac{d \varphi_{sd}}{dt} i_{sd} + \frac{d \varphi_{sq}}{dt} i_{sq} \quad \text{(II. 56)}$$

Le terme $\{\omega_s (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd})\}$ correspond à la puissance mécanique :

$$P_m = \omega_s (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}) = C_e \frac{\omega_s}{p} \quad \text{(II. 57)}$$

Avec p désigne le nombre de paires de pôles de la machine.

Donc le couple mécanique s'exprime par :

$$C_e = p(\varphi_{sd}i_{sq} - \varphi_{sq}i_{sd}) \quad (\text{II. 58})$$

II.4 Conclusion

Les systèmes de pompage solaire permettent un approvisionnement en eau à partir d'une source à n'importe quel endroit même si aucune source d'énergie n'est présente sur le site. La source peut être un bassin, un puits, un forage ou une rivière. Dans ce chapitre, nous avons vu comment les pompes solaires sont particulièrement adaptées aux régions isolées et à fort ensoleillement. Ceci est dû à l'autonomie et la longue durée de vie du pompage solaire et la quasi-absence de maintenance. Le pompage solaire fonctionne au fil du soleil en utilisant un réservoir d'eau ce qui exige un dimensionnement précis et une organisation optimale du pompage pour une meilleure efficacité de la production des panneaux solaires.

CHAPITRE III.SIMULATION ET REALISATION DU SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

III.1 Introduction

Du fait que les zones enclavées au sud du pays sont difficiles et économiquement pas rentables à les raccorder au réseau électrique et les habitations dans ces régions sont éparses et souvent nomades, le pompage solaire de l'eau potable et d'irrigation représente la solution la plus adaptée pour ces régions. Un système de pompage photovoltaïque a été installé à l'école afin de permettre l'acquisition des compétences nécessaires, notamment la simulation, le dimensionnement et la réalisation de ces systèmes dans ce domaine. Dans ce chapitre, nous présentons la simulation et la réalisation du système de pompage photovoltaïque. Ensuite nous montrons l'influence de la température et de l'éclairement sur les performances du système.

Pour la réalisation du système de pompage solaire à l'école, nous présentons en premier lieu la simulation des systèmes de pompage. Ensuite nous présentons une méthode de dimensionnement du système de pompage, ce qui permet de définir la taille des éléments de notre système, de déterminer le nombre de panneaux nécessaires, pour satisfaire les besoins quotidiens en eau d'un projet à venir.

III.2 Simulation du système de pompage photovoltaïque

Pour dimensionner et tester les éléments du système de pompage solaire, une étape essentielle consiste à simuler chaque composant de l'installation seul puis le système global. Ainsi, certaines simulations des panneaux photovoltaïques, des convertisseurs électroniques et la pompe sont présentés maintenant en utilisant l'environnement Simulink de MATLAB

III.2.1 Simulation de l'onduleur

Sur la base du modèle mathématique de l'onduleur développé dans le sous chapitre (II.3.2), le bloc schématique de Simulink est montré sur la figure III-1.

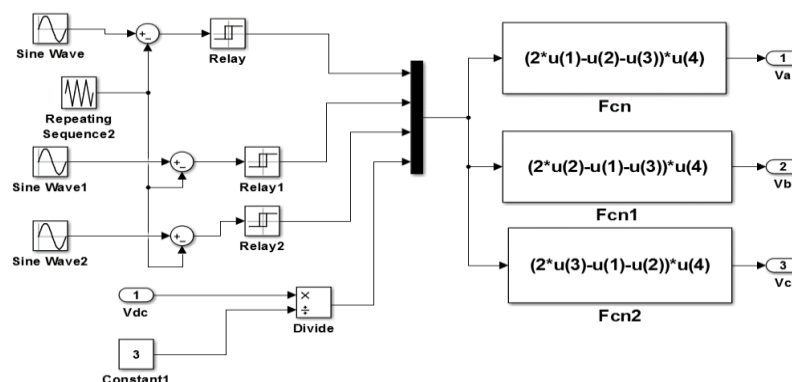


Figure III-1 Schéma bloc Simulink de l'onduleur..

La figure suivante montre la forme d'onde de la tension issue de l'onduleur et sa composante fondamentale. L'analyse spectrale de cette tension montre son facteur de distorsion

qui est acceptable pour une installation domestique et non optimisée. La valeur efficace et la fréquence sont adoptées pour permettre l'utilisation d'un moto-pompe disponible sur le marché algérien.

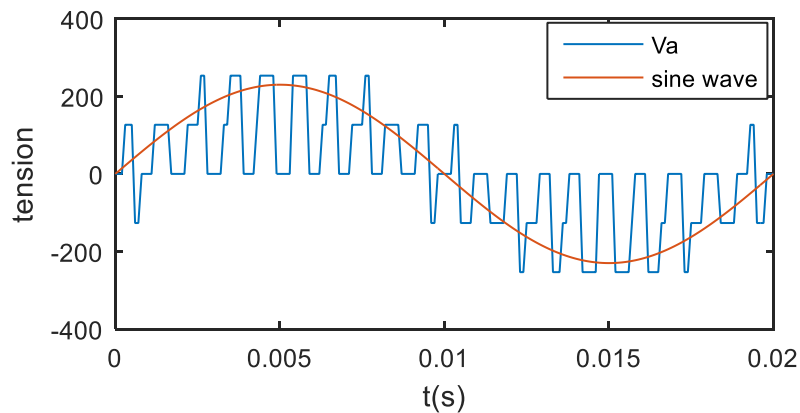


Figure III-3 La tension de sortie de l'onduleur.

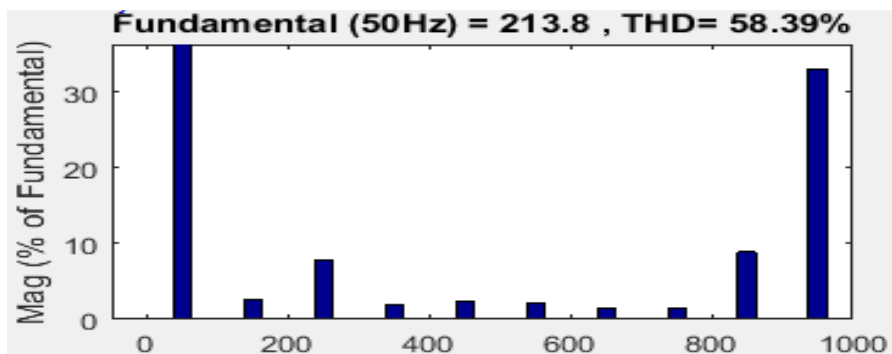


Figure III-3L'analyse spectrale de la tension de sortie de

III.2.2 Simulation de de la pompe

Le modèle Simulink de la pompe centrifuge est présenté sur la figure III-4. Ce bloc schématique est construit sur la base du modèle mathématique développé dans le sous chapitre (II.3.3).

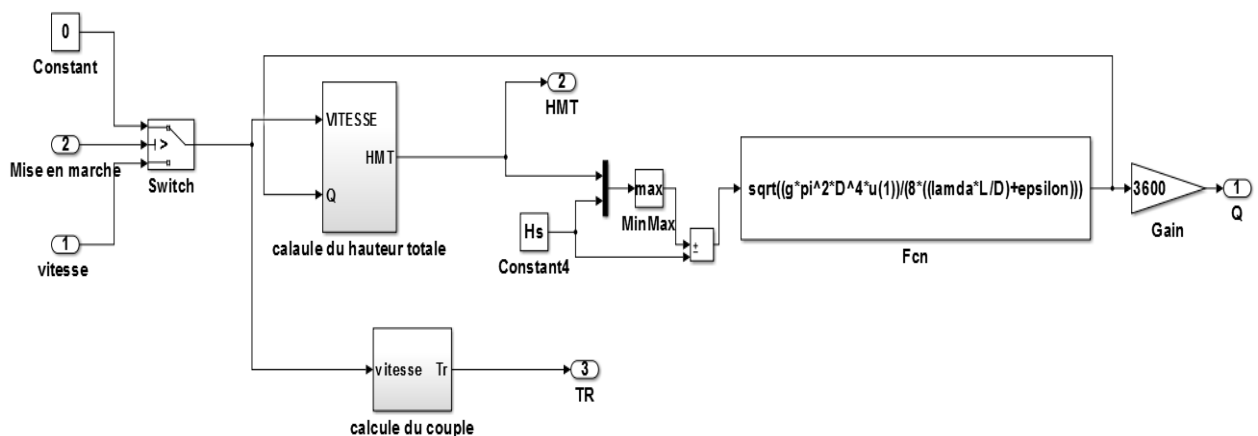


Figure III-4 Schéma bloc Simulink de la pompe centrifuge.

La caractéristique principale de la pompe centrifuge réside dans l'allure de la hauteur manométrique totale en fonction du débit (figure III.5). Il est clair que la hauteur manométrique totale décroît avec l'augmentation du débit, du fait de l'augmentation des pertes par frottement dans la pompe. Depuis la figure III.6, on constate que pour une hauteur manométrique donnée, le débit diminue en diminuant la vitesse de rotation de la pompe.

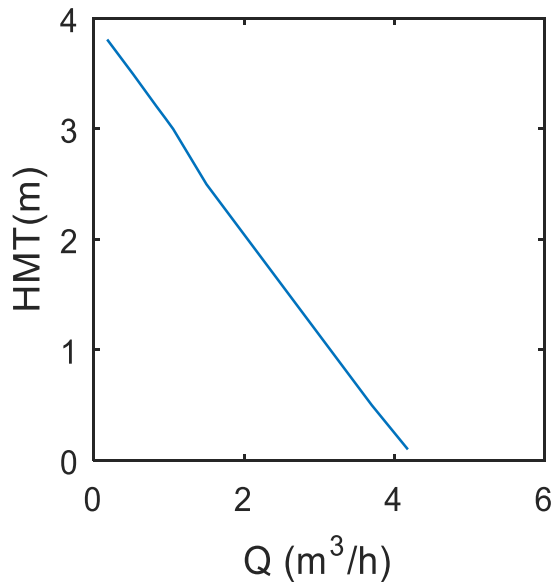


Figure III-5 La hauteur manométrique totale en fonction du débit

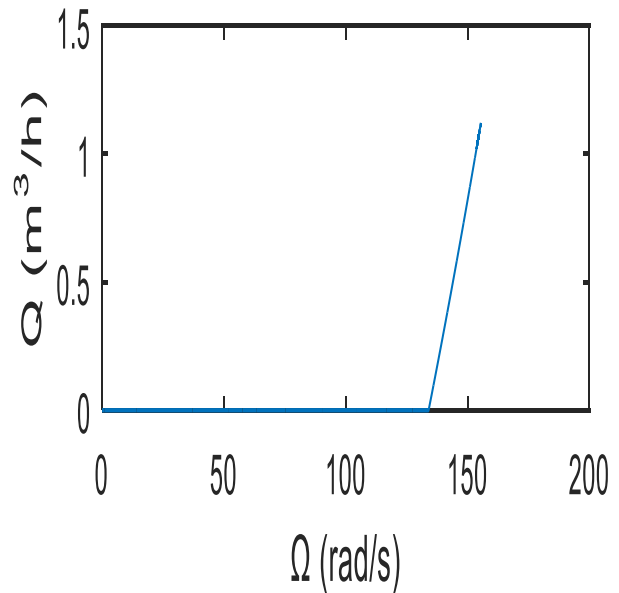


Figure III-5 Le débit en fonction la vitesse de rotation de la pompe.

III.2.3 Simulation du système global

Une fois les différents composants du système global de pompage solaire sont simulés et connus, nous allons maintenant, simuler l'association directe GPV-convertisseur-moto-pompe qui représente le choix le plus simple et le moins coûteux. Le schéma bloc globale du système de pompage est représenté sur l'environnement Simulink comme suit :

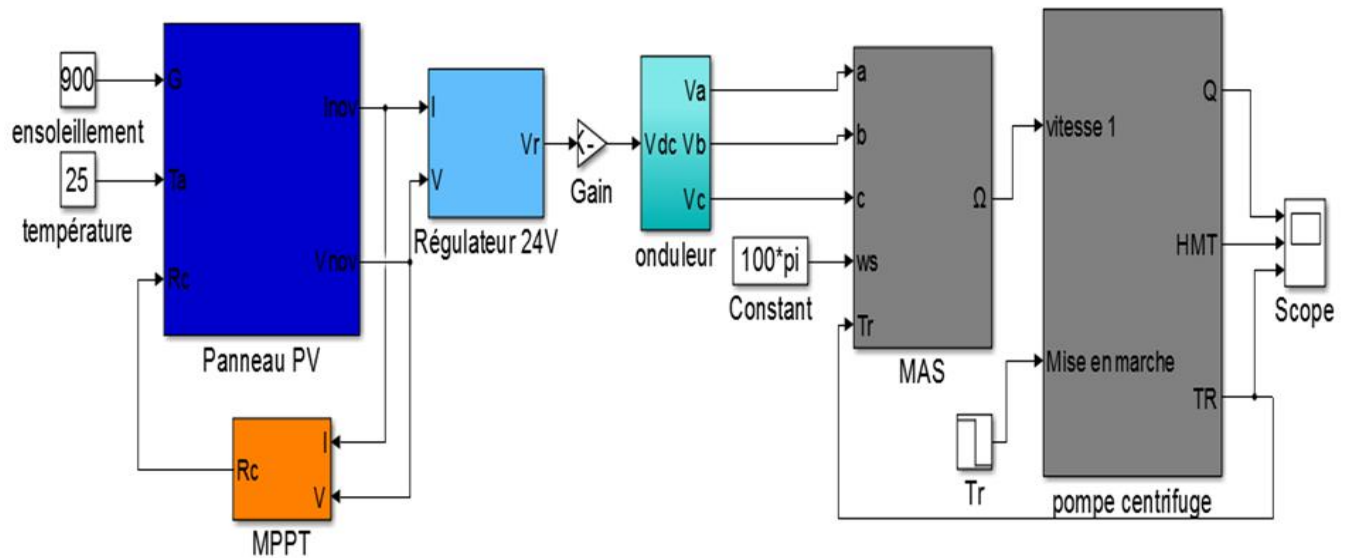
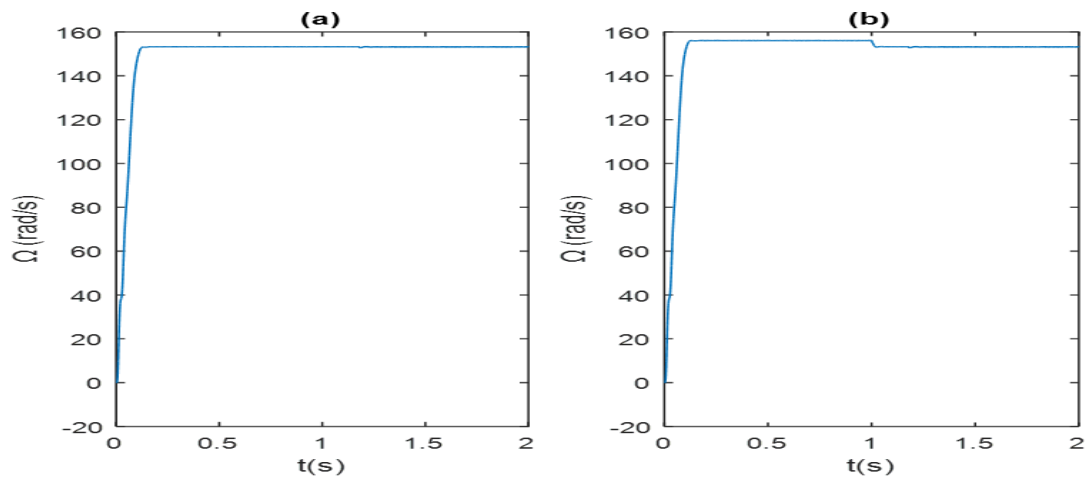
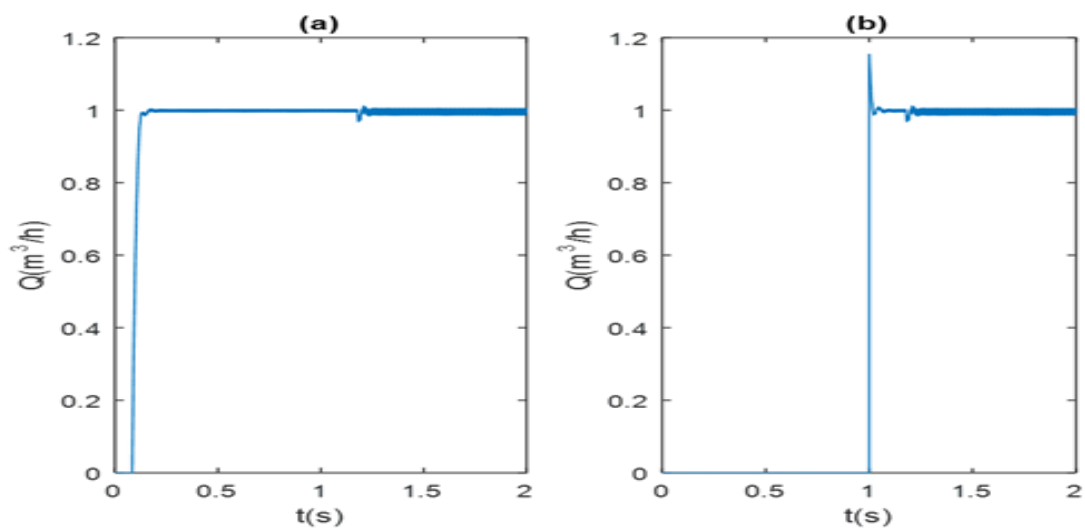
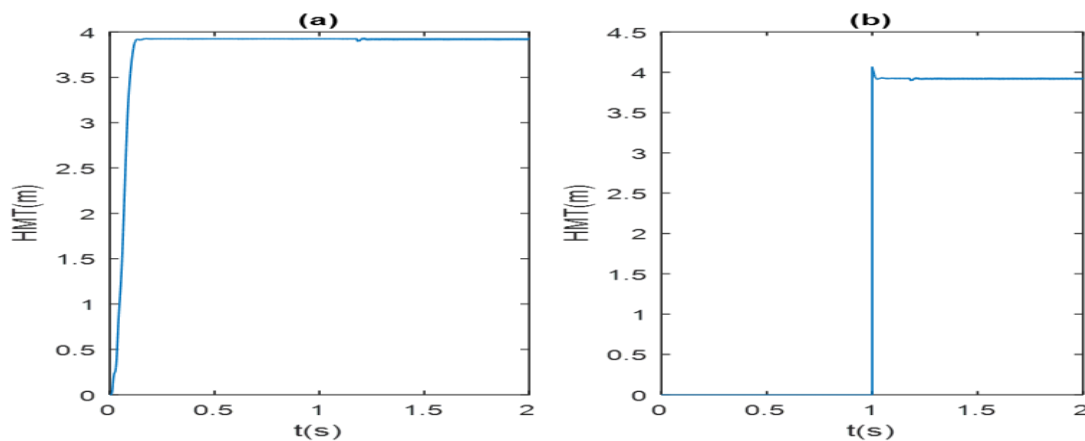


Figure III-6 Bloc de simulation du système global de pompage.

On a effectué deux simulations, la première consiste à coupler la pompe au moteur directement à $t=0s$, dont les courbes sont notées par l'indice (a), puis la deuxième est notée par (b), où la pompe est couplée au moteur après le démarrage à $t=1s$.

Figure III-9 la vitesse Ω (rad/s)Figure III-9 débit d'eau Q (m^3/h)Figure III-9 Hauteur manométrique HMT (m)

Le convertisseur électronique est choisi de manière à assurer une tension similaire à celle du réseau électrique (220V/50Hz). Ceci revient à supposer que la puissance maximale extraite du panneau est totalement exploitée pour le pompage de l'eau. Nous remarquons que dans les deux cas le système tend vers le même point de fonctionnement. Seulement, en pratique on préfère un

démarrage à vide puis la charge une fois le régime permanent s'établit pour éviter les phénomènes accompagnant les forts régimes transitoires.

III.3 L'effet de la température et de l'éclairement

En pratique, la puissance extraite du panneau dépend fortement de de l'éclairement (flux lumineux) et de la température. Ceci influe énormément sur les caractéristiques du système de pompage (débit d'eau, vitesse, etc.).

III.3.1 L'effet de la température

L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert et ainsi une diminution de la puissance maximale. Ceci rend la température un paramètre très important dans la caractéristique des cellules solaires. Elle a donc une influence sur le comportement du système de pompage (figure III-11).

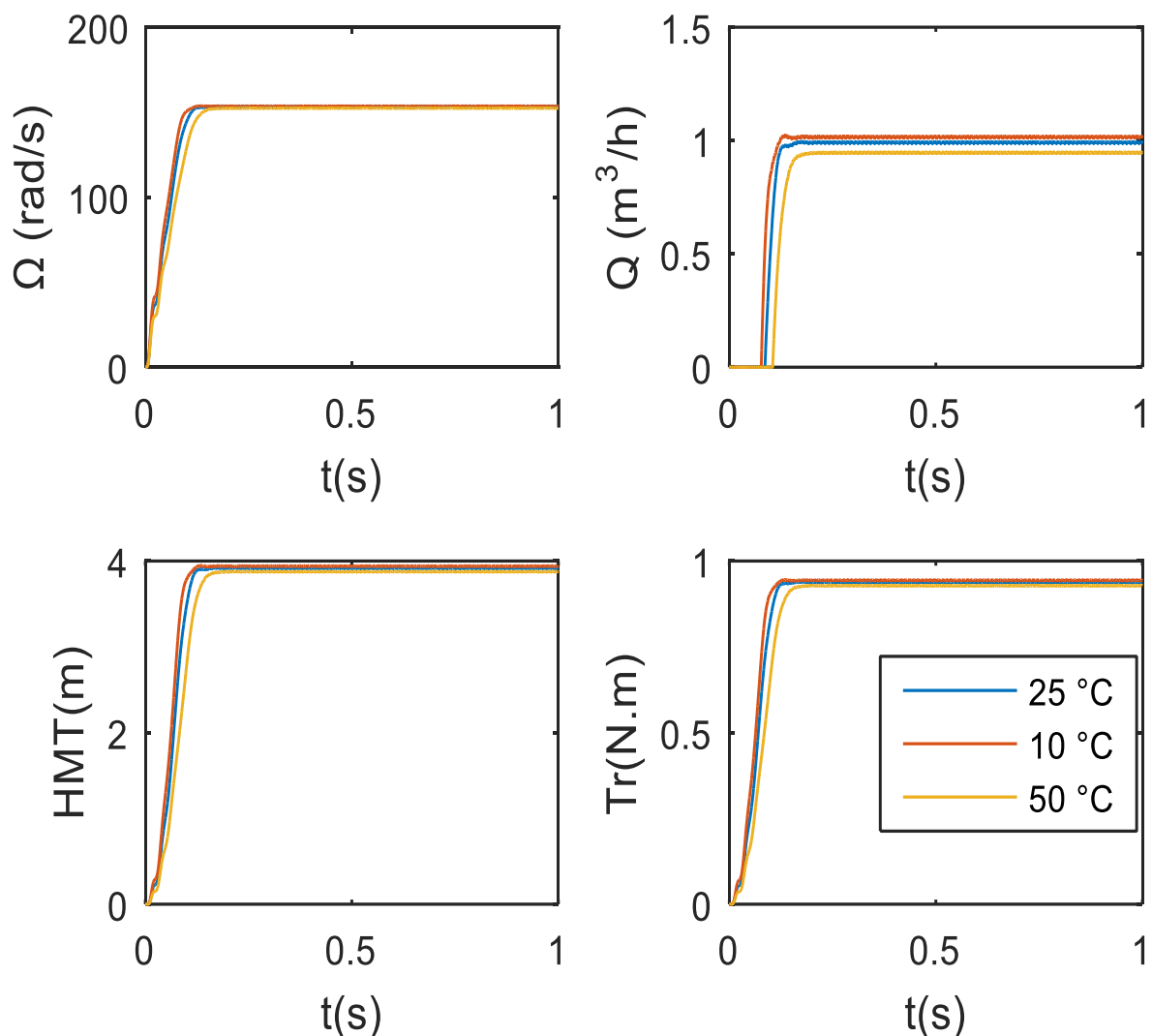


Figure III-10 Influence de la température à un ensoleillement constant.

III.3.2 L'effet de l'éclairement

La puissance délivrée par le générateur PV varie pour des différents niveaux de l'irradiation à une température constante à cause des variations du courant du module photovoltaïque. Les figures suivantes montrent clairement l'influence de l'éclairement sur le comportement du système de pompage. Il est clair que le débit et la hauteur manométrique diminuent sensiblement avec la diminution de de l'éclairement.

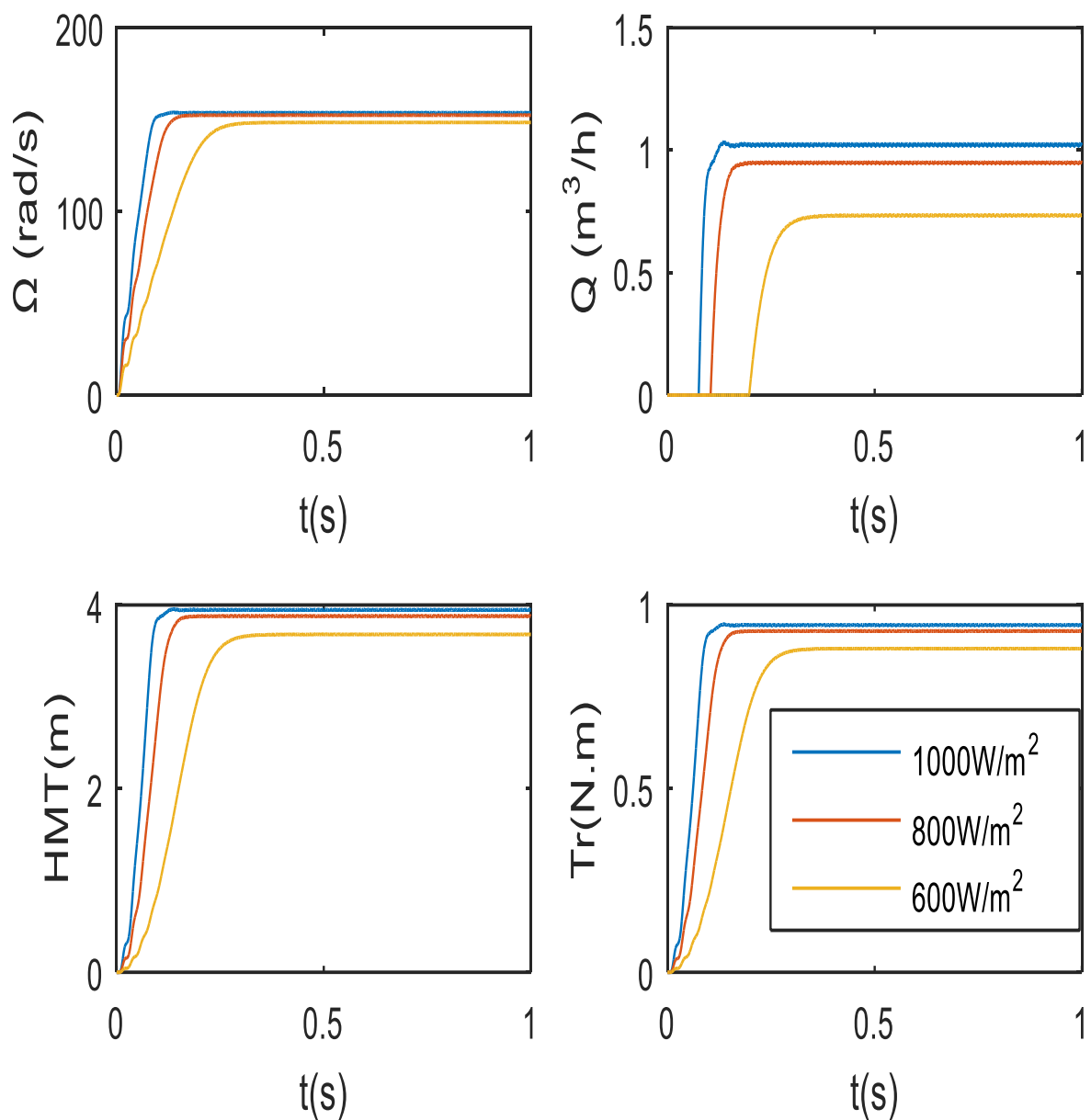


Figure III-11 Influence de l'ensoleillement à une température constante.

La simulation de l'influence de l'ensoleillement et la température sur le comportement du système de pompage solaire montre l'effet de l'heure de pompage pendant la journée. Même avec la possibilité d'orienter le panneau solaire suivant les 2 axes, et de suivre la course du soleil durant la journée, le comportement du système de pompage solaire est sensiblement variable pendant la journée. Ceci est dû au fait que plus l'épaisseur d'atmosphère traversée est importante, plus la quantité d'énergie solaire reçue par le panneau est faible.

III.4 Dimensionnement du système de pompage réalisé à l'école

Cette étude de dimensionnement permet de savoir les caractéristiques nominales des composants nécessaires pour la réalisation du système de pompage solaire. Les étapes de dimensionnement sont organisées comme suit :

III.4.1 Estimation des besoins en eau

L'estimation des besoins en eau constitue la base du dimensionnement de système de pompage solaire photovoltaïque. Un réservoir d'eau, d'une capacité de 1 m^3 et un débit de remplissage nominal $Q_n = 20 \text{ L/min} = 1.2 \text{ m}^3/\text{h}$ et une hauteur manométrique totale $HMT = 4 \text{ m}$. Ces calculs permettent de dimensionner le générateur photovoltaïque, le régulateur et le moteur envisageables à cette application.

III.4.2 Puissance hydraulique

La puissance hydraulique nécessaire pour déplacer l'eau d'un point à un autre est donnée par :

$$P_h = \rho \cdot g \cdot HMT \cdot Q = 1000 \cdot 9.81 \cdot 19 \cdot 1.2/3600 = 62.13 \text{ W} \quad (\text{III. 1})$$

III.4.3 Puissance mécanique

Si on néglige les pertes d'accouplement entre le moteur et la pompe centrifuge, donc la puissance mécanique délivrée par le moteur est égale à la puissance absorbée par la pompe. Le rendement de la pompe centrifuge est donné par le constructeur, pour pouvoir choisir le moteur d'entraînement nécessaire.

Le rendement est d'environ 50%. Donc, elle a besoin d'une puissance mécanique de :

$$P_{méc} = \frac{P_h}{\eta_{pompe}} = \frac{62.13}{0.50} = 124.26 \text{ W} \quad (\text{III. 2})$$

III.4.4 Puissance électrique

Le rendement de la machine asynchrone est au voisinage de 85% d'où :

$$P_{\text{élc}} = \frac{P_{\text{méc}}}{\eta_{\text{moteur}}} = \frac{124.26}{0.85} = 146.18W \quad (\text{III. 3})$$

III.4.5 Puissance électrique demandée

L'onduleur possède un rendement autour de 95%. Ainsi, la puissance issue de l'onduleur doit dépasser un minimum de :

$$P_{\text{délivrée}} = \frac{P_{\text{élc}}}{\eta_{\text{ond}}} = \frac{146.18}{0.95} = 153.88W \quad (\text{III. 4})$$

III.4.6 La puissance du générateur photovoltaïque

Les pertes de puissance du GPV+Régulateur attribuables à la température et à la poussière de notre endroit sont supposées présentent le un cinquième de la puissance nominale des modules.

La puissance électrique fournie par le générateur photovoltaïque est donnée par l'expression suivante :

$$P_{\text{GPV}} = \frac{P_{\text{délivrée}}}{1 - \sum \text{pertes}} = \frac{153.88}{1 - 0.2} = 192.35W \quad (\text{III. 5})$$

III.4.7 Nombre de panneaux

En arrondissant la puissance du GPV, on a choisi des panneaux solaires ayant une puissance nominale de 200W.

$$\frac{P_{\text{GPV}}}{P_s} = \frac{192.35}{200} = 0.96 \leq N = 1 \quad (\text{III. 6})$$

Donc le nombre de panneaux est un seul panneau.

III.4.8 Energie journalière

L'énergie journalière égale la quantité de la puissance à consommer par le système de pompage de l'eau pendant une journée afin de remplir le réservoir d'eau de capacité de 1 m³ par jour.

La durée de pompage :

$$T_{\text{pompage}} = \frac{V}{Q_n} = \frac{1000}{20} = 50\text{min} = \frac{5}{6}\text{heurs} \quad (\text{III. 7})$$

Chaque jour, la pompe doit fonctionner avec une puissance de 32.39W pendant 50min.

Donc, l'énergie journalière nécessaire est :

$$E_c = T_{\text{pompage}} P_{\text{délivrée}} = \frac{5}{6} \times 153.88 = 128.23\text{Wh/j} \quad (\text{III. 8})$$

III.5 Réalisation du système de pompage

Il est nécessaire d'organiser la consommation de l'eau durant les périodes les plus favorables, c'est-à-dire les plus ensoleillées de la journée. Donc le pompage se fait à midi lorsque l'épaisseur d'atmosphère traversée par les rayons solaires est le plus faible de la journée pour que la quantité d'énergie solaire reçue par le panneau est la plus importante.

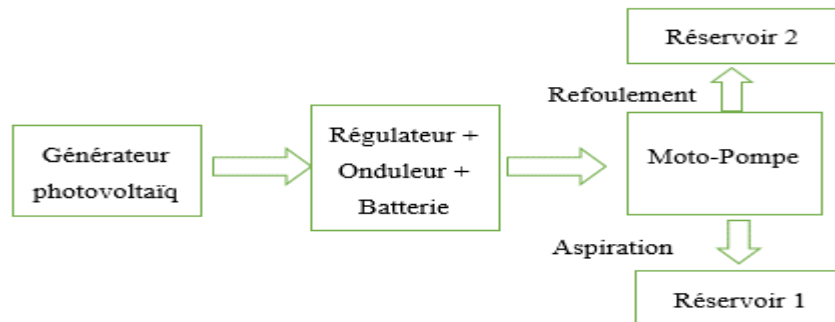


Figure III-12 Schéma synoptique du système de pompage

III.5.1 Le panneau solaire

Pour avoir un rendement optimal du panneau solaire, nous avons orienté le panneau vers le sud avec une inclinaison de 35°. Les caractéristiques du panneau utiliser sont données sur le tableau suivant.

Tableau III-1 Les caractéristiques du panneau

Puissance maximale	200W
Courant de court-circuit	5.86A
Tension de circuit ouvert	48.76
Courant maximale	5.28A
Tension maximale	37.9V
Diode bypass	2



Figure III-13 L'installation du panneau solaire.

III.5.2 Les canalisations

La canalisation de remplissage est une tuyauterie multicouche permettant de réaliser un circuit apparent, facile à poser, cintrable à la main, sans soudure et de diamètre égal à 20mm.

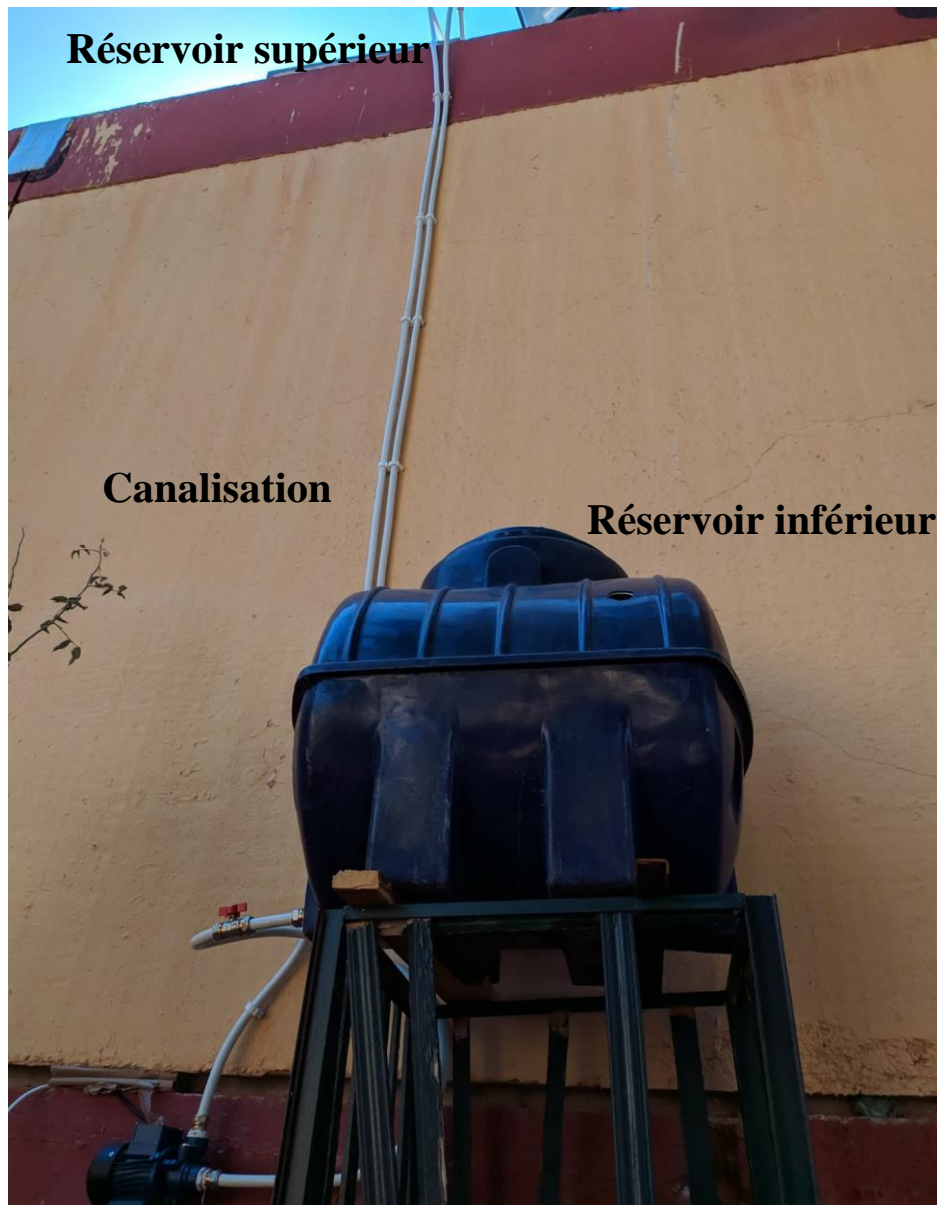


Figure III-14 photo de l'installation de la canalisation

III.5.3 Le moto-pompe

Les moto-pompes solaires sont généralement de rendement élevé (utilisation de technologies de pointe). Les moteurs des pompes de petite puissance (petite HMT et faible débit journalier) sont en courant continu sans balais et de faible tension : 12V ou 24V. Mais pour raison de disponibilité, nous avons choisi un moto-pompe d'utilisation domestique de caractéristiques suivante :

Tableau III-2 Les caractéristiques du moto-pompe

Puissance	0.125KW(0.17HP)
H.max	19m
Q.max	20L/min($1.2m^3/h$)
Dimensionnement	240×140×170mm
Tension	220V
fréquence	50Hz



Figure III-15 Installation du moto-pompe.

III.5.4 Le convertisseur

Puisque le moteur est asynchrone monophasé, convertisseur continu/alternatif (onduleur) extérieur de 200W a été installé. La tension continu à l'entrée égale à 12V (choisi suivant le régulateur disponible) alors que la tension alternative à la sortie est similaire à celle du réseau publique (fréquence 50Hz et valeur efficace de 230V).



Figure III-16 Onduleur monophasé 500W

III.5.5 Le régulateur

Pour le pompage solaire, le régulateur électronique doit permettre d'obtenir en permanence le meilleur point de fonctionnement de la pompe (MPPT) malgré les variations de l'ensoleillement. Dans la plupart des cas, il permet également de gérer le chargement et le déchargement des batteries en cas de manque d'ensoleillement et la protection des batteries contre la décharge profonde. Puisque le régulateur solaire à MPPT est très cher alors que notre projet ne nécessite qu'une énergie journalière de 27Wh/j, Nous utilisons un simple régulateur + batterie pour contrôler le chargement et le déchargement de la batterie.

Lorsque la batterie est complètement chargée par le panneau via le régulateur, le pompage est lancé jusqu'à un niveau minimum de charge. Ensuite, la batterie se charge pour pouvoir lancer le pompage de nouveau jusqu'à remplir complètement le réservoir.



Figure III-18 Simple régulateur



Figure III-18 Batterie solaire

III.5.6 L'organisation du pompage

Le régulateur impose une tension de presque 14.5V pour charger la batterie puis cette tension diminue pour se stabiliser à 13.2V (Figure III-20) lorsque la batterie est complètement chargée. Dans cette zone, la puissance n'est pas maximale.

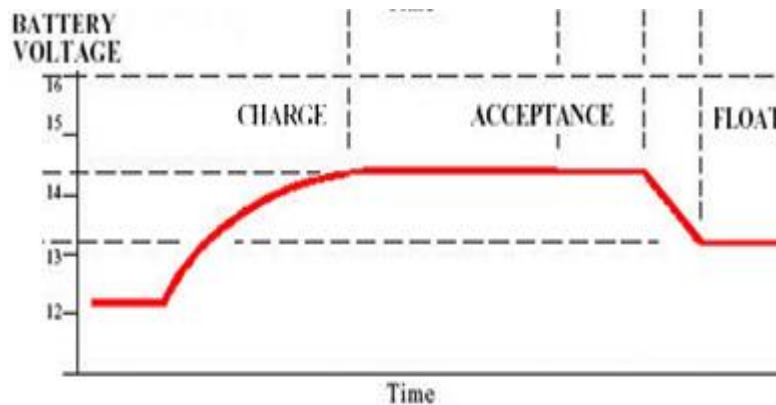


Figure III-19 Courbe de charge d'une batterie [32].

La puissance est estimée à environ 46W ($14V \times 3.3A$) pour un ensoleillement de $800W/m^2$. Ceci montre que l'opération de chargement de la batterie nécessite presque deux heures. Lorsque la batterie est initialement chargée, L'énergie cumulée sera égale :

$$E_{bat} = C * V = 7 * 12 = 84Wh$$

Avec "C = 7AH " est la capacité de la batterie et "V = 12V" est la tension à ces bornes.

Un déchargement de la batterie (de 100% à 20%) fournie à la pompe une énergie de pompage égale :

$$E_{pompe}^1 = 84 * 0.8 = 67.2Wh$$

Ainsi, une opération de chargement-déchargement de la batterie fournissent à la pompe une énergie de pompage suffisante pour remplir complètement le réservoir

$$E_{pompe} = 2E_{pompe}^1 = 134.4Wh > E_c$$

Mesure de débit d'eau

Après la réalisation de montage, nous avons pris des mesures du débit en fonction du temps, sachant que

- La température ambiante moyenne de 30°C.
- Une inclinaison de 35° orienté vers le sud.
- Hauteur manométrique totale de 4m.

- Un ensoleillement de $800\text{W}/\text{m}^2$.

Tableau III-3 Mesure du débit

Débit(L/min)	0	18	17.2	16.8	17.2	17	16.4	15.6	15.5
Temps(s)	0	7.6	27.6	69	129	189	214	234	269

Le graphe du débit est représenté sur la figure suivante.

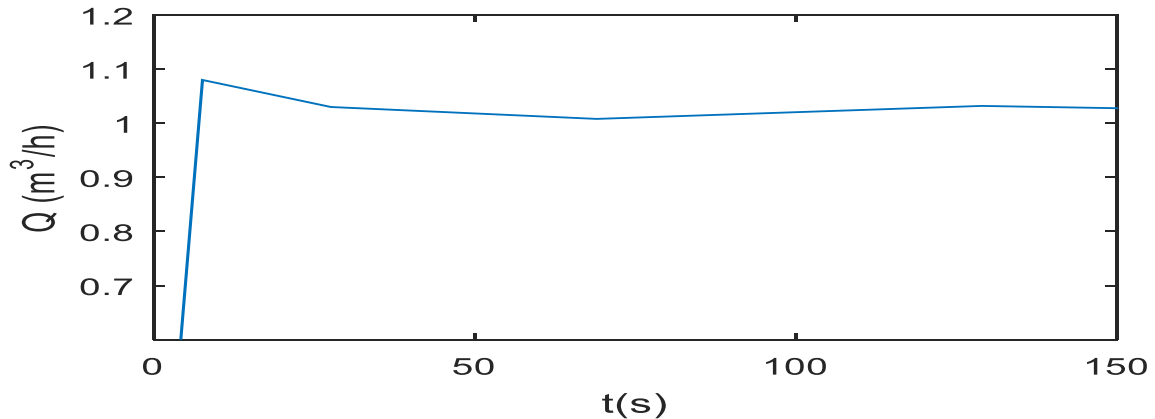


Figure III-20 débit d'eau expérimentale.

III.6 Conclusion

L'objectif de notre étude est la réalisation d'un système de pompage photovoltaïque fonctionnant au fil du soleil basé sur un moteur asynchrone qui entraîne une pompe centrifuge qui aspire l'eau d'un niveau bas et le refoulé dans un réservoir (niveau haut). La réalisation sur un site de l'école a pour but de satisfaire les besoins quotidiens en eau d'un projet à venir. Nous avons présenté une prédétermination des caractéristiques par simulation du système de pompage photovoltaïque et un dimensionnement pour permettre l'acquisition des compétences pratiques pour la réalisation de ces systèmes dans ce domaine.

La puissance extraite du panneau dépend fortement de de l'éclairement et de la température et la météo de la journée. Ceci influe énormément sur les caractéristiques du système de pompage. Pour l'amélioration de la réponse du système de pompage solaire, une commande du moteur asynchrone doit être introduite. Ceci permet par conséquent de contrôler le débit et la hauteur manométrique de la pompe.

La puissance extraite des GPVs varie pendant la journée, alors que le pompage de l'eau comme le stockage ne doit être fait que durant une période limitée de la journée. Il est nécessaire d'installer un système de gestion du pompage et de la consommation de l'eau durant les périodes les plus favorables.

Conclusion générale

Conclusion

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation, la simulation d'un système de pompage photovoltaïque. Ainsi le dimensionnement de ce système en vue de la réalisation expérimentale sur un site de notre école. Le système de pompage photovoltaïque, permettant d'alimenter en eau potable les sites isolés ou aucune source d'énergie n'est disponible. Le modèle du panneau choisi a été simulé dans un environnement MATLAB pour différentes températures et éclairement, le but de cette simulation est de déterminer l'influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques électriques, et par conséquent sur leur rendement. .

Pour une optimisation de l'énergie délivrée par le générateur photovoltaïque. La technique de poursuite de puissance maximale MPPT est très utile. Mais cette technique présente quelques inconvénients tels que la complexité d'implantation et le prix élevé. Pour notre cas, nous utilisons un simple régulateur + batterie pour contrôler le chargement et le déchargement de la batterie suivant nos besoins en eau au fil du soleil.

Notre système de pompage solaire installé à l'école est un montage simple et adaptable à des niveaux de puissances divers. Ces systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant de quelques Watt au quelques MégaWatt. Son coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé. La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant (électricité propre), silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu ce qui rend notre système de pompage très adaptable à l'approvisionnement en eau pour l'aquaculture (l'élevage de poissons ou d'autres d'espèces aquatiques) et l'hydroponie (la culture de végétaux hors-sol).

Nous pouvons proposer comme pistes pour des projets à venir et comme perspectives suivantes :

- Munir ce système de pompage avec une carte de commande MPPT avec poursuite du soleil et organisation de l'opération du pompage pour améliorer le rendement de l'installation du pompage solaire.
- Implanter ce système photovoltaïque pour faire circuler et renouveler l'eau du bassin à poisson périodiquement, assurer une exposition maximale des plantes et des poissons de l'aquaponie à la lumière.

Références bibliographiques

1. Boukhlifa Hamza, "Dimensionnement technique d'une installation photovoltaïque De 300kw," *Memoire de master de l'université de M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES*, 2017.
2. F. Harouadi , B. Mahmah , M. Belhamel , S. Chader , A. M'Raoui et C. Etievant, ' *Les potentialités d'exploitation d'hydrogène solaire en Algérie dans un cadre euro – maghrébin Partie I: Phase d'étude d'opportunité et de faisabilité* ', *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 10 N°2 (2007) 181 – 190
3. BOUDEN ABDELMALEK, "Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque," *Memoire de magister de l'université de Mentouri de Constantine*, 2008.
- 4 J. Royer, T. Djiako, « *Le Pompage Photovoltaïque* », *Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, université d'Ottawa/EIER /CREPA*, 1998.
5. <http://www.photovoltaique.info/Les-technologies-de-cellules.html>
6. HANANOU FATIHA, ROUABAH AICHA, "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque," *Memoire de master de l'université de OUARGLA*, 2014.
7. Djamila Rekioua • Ernest Matagne "Optimization of Photovoltaic Power Systems, Modelization, Simulation and Control," *Springer-Verlag London Limited* 2012.
8. RACHID CHENNI, "ÉTUDE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UN SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE DANS UN VILLAGE SOLAIRE.," *THESE Doctorat en Sciences en Physique Énergétique, de l'université de Mentouri de Constantine*, 2007.
9. HELALI KAMELIA, "Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative," *Memoire de magister de l'université de MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU*, 2012.
10. Angel Cid Pastor « *Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques* ». *Thèse de Doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse*, 2006.
11. T. Esmam and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, Jun. 2007.
12. A. Oi. "Design and simulation of photovoltaic water pumping system ", *Memoire Master of Science in Electrical Engineering, California Polytechnic State University San Luis Obispo*, 2005
13. T. Esmam and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques", *IEEE Transactions on Energy Conversion* 22 (2007), no. 2, 439–449.
14. KETTAB Ahmed, « *Les ressources en eau en Algérie* », in the *Conference on Desalination Strategies in South Mediterranean Countries, cooperation between*

- Mediterranean Countries of Europe and the Southern Rim of the Mediterranean, Tunis, September 2000.*
15. M. Laamayad Tahar, ‘‘Commande optimale d’une machine asynchrone apport de la logique floue,’’ *Memoire de magister de l’université de Batna, 2008.*
 16. Bernard Multon. *Electronique de puissance : : alimentations à découpage. Master. France. 2017.*
 17. Sylvain Noblecourt. *Conception et réalisation de composants de puissance à superjonction et à tranchées profondes pour des applications 600 V et 1200 V. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2016. Français.*
 18. M. Mans our Niang & Souleymane Diop ‘‘ Les pompe solaires : Dimensionnement d'une station de pompage en zone maraîcher’’, *Institut Superieur de Technologie Industrielle - D IT Electrotechnique- Electromécanique-Froid et Climatisation 2008.*
 - 19 Ksb" *Determination Des Pompes Centrifuges " 0101.5/5 / 12.05 / Ottweiler / Germany*
 - 20 D. WEINER & A. LEVINSON (1996) *AN OPTIMAL OPERATION DESIGN OF A PHOTOVOLTAIC D.C. MOTOR COUPLED WATER PUMPING SYSTEM, Electric Machines & Power Systems, 24:3, 277-288,.*
 21. M. N. Mansouri, N. Ghanmi et M. F Mimouni, ‘‘Commande et analyse des performances d’une station de pompage photovoltaïque fonctionnant en régime optimal’’ *Revue des énergies renouvelables, Volume 11, Numéro 1, Mars 2008,.*
 22. J.P.Caran, J.P.Hautier : ‘‘Modelisation et commande de la machine Asynchrone’’. *Collection dirigée par Pierre Borne. Editions Technip, 1995.*
 23. R.Saleh, «Application à la machine asynchrone : commande vectorielle sans capteurs mécanique SVPWM mode glissant MRAS», *Mémoire de Magister , Université Mentouri de constantine, Algérie. 2009*
 24. A. Merabet, ‘‘Commande non linéaire à modèle prédictif pour une machine asynchrone’’, *Thèse De Doctorat En Ingénierie. L’université Du Québec. Mai 2007.*
 25. C.Azeddine, «Commande Backstepping d’une machine asynchrone sans captures de vitesse» *Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie.2011.*
 26. B. Patrick, *Introduction à la commande vectorielle des machines asynchrones, LTEG Henri BRISSON, 25 Avenue Henri BRISSON, 18108 VIERZON.*
 27. Zaamta S, Dib A. *Réalisation d’un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l’état de charge et la protection des accumulateurs. Revue des Energies Renouvelables 2009;12:137–47*
 28. B.Hosseini, «Prototypage rapide à base de FPGA d’un algorithme de contrôle avancé pour le moteur à induction», *Université de Québec a trois rivières, Canada. 2010.*
 29. A.Meroufel, «Contrôle de la machine asynchrone», *Université Djilali Liabés Sidi Bel Abbes, Algérie 2009.*

Références

30. A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud and I. Youm, Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 11 N°3, pp. 473-483, (2008).
31. MESSAID Mohamed Laid, BENLAHRACH Mohamed Ali «Etude et réalisation d'un dispositif de poursuite Pour panneau photovoltaïque» *Mémoire de Magister, Université de Ouargla, Algérie.2016.*
32. [https://www.swiss-batteries.ch/fr/content/80-phase-de-charge-des-batteries.](https://www.swiss-batteries.ch/fr/content/80-phase-de-charge-des-batteries)