

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université A. MIRA – BEJAIA**



**Faculté de Technologie**

**Département de Génie électrique**

**Spécialité : Energies renouvelables**

## **MEMOIRE DE FIN D'ETUDE**

En vue de l'obtention du diplôme de Master

**Thème**

**Etude et simulation d'un système de pompage  
photovoltaïque**

**Réalisé par :**

ZEGGANE Samir

**Encadreur :**

Mme REKIOUA Djamila

**Co-Encadré par :**

Melle BELAID Saloua

**Promotion 2021/2022**

## Remerciements

*Je tiens à remercier gracieusement ma directrice de mémoire, professeur Rekioua Djamilia d'avoir accepté de m'encadrer, je lui exprime toute ma reconnaissance pour ses conseils et sa confiance en mon travail et son suivi depuis ma première année master.*

*Je remercie sincèrement Melle :la doctorante Belaid Saloua, pour sa disponibilité, son aide et son accompagnement tout au long de mon travail.*

*J'adresse mes remerciements à tous les membres de ma famille qui m'ont toujours soutenu et aidé, et je remercie également Melle Kaddour Taous pour ses conseils et ses encouragements.*

SamirZeggane

# Dédicaces

*En hommage à mon oncle, BECHIR MOURAD, qu'il repose en paix.*

*A toute ma famille, pour leurs sacrifices, leur soutien, leur encouragement, Spécialement ma  
chère maman que dieu la bénisse.*

*A tous mes chers amis et collègues d'études : Mounir, Saad, Rabah, Kaci, Fayçal ainsi que  
tous les autres.*

*Et bien-sûr à Taous Kaddour qui m'a tant aidé et motivé.*

*A toute personne qui m'a aidé de prêt ou de loin durant tout mon parcours d'études.*

*Zeggane Samir.*

<b>Nomenclature (Abréviations et symboles)</b>	_____	
<b>Liste des figures</b>	_____	
<b>Liste des tableaux</b>	_____	
<b>Introduction générale</b>	_____	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I Généralités sur les systèmes de pompage photovoltaïque</b>		
<b>I Introduction</b>	_____	<b>2</b>
<b>I.1 L'énergie solaire</b>	_____	<b>2</b>
I.1.1 L'effet photovoltaïque	_____	2
I.1.2 Quelques avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	_____	2
I.1.3 Les panneaux photovoltaïques	_____	3
I.1.4 La cellule photovoltaïque	_____	3
I.1.4.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	_____	3
I.1.4.2 Quelques types de cellules photovoltaïques	_____	4
I.1.4.2.1 Les cellules monocristallines	_____	4
I.1.4.2.2 Les cellules poly cristallines	_____	4
I.1.4.2.3 Les cellules amorphes	_____	5
I.1.5 Générateur photovoltaïque	_____	5
I.1.6 Champ photovoltaïque	_____	5
I.1.7 Association série parallèle des panneaux photovoltaïques	_____	5
I.1.7.1 Branchement en série	_____	5
I.1.7.2 Branchement en parallèle	_____	6
I.1.7.3 Branchement série/parallèle	_____	7
I.1.8 Les systèmes photovoltaïques	_____	7
I.1.8.1 Les systèmes autonomes	_____	7
I.1.8.1.1 Les systèmes autonomes sans stockage	_____	7
I.1.8.1.2 Les systèmes autonomes avec stockage électrochimique	_____	7
I.1.8.2 Les systèmes photovoltaïques hybrides	_____	8
I.1.8.3 Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau	_____	8
I.1.9 Différentes applications des systèmes photovoltaïques	_____	8
I.1.10 Problèmes liés aux panneaux solaires	_____	8
I.1.11 L'ombrage des panneaux photovoltaïques	_____	9
I.1.12 Quelques types d'ombrages	_____	9
I.1.13 Solution pour remédier aux problèmes d'ombrage	_____	9
<b>I.2 Pompage photovoltaïques</b>	_____	<b>9</b>
I.2.1.1 Différents types de pompes photovoltaïques	_____	10
I.2.1.1.1 Le pompage au fil du soleil	_____	10
I.2.1.1.2 Le pompage avec stockage hydraulique	_____	10
I.2.1.1.3 Le pompage avec stockage électrochimique	_____	10
I.2.1.2 Composants d'un système de pompage photovoltaïque	_____	10
I.2.1.2.1 Les différents types de stockages	_____	10
I.2.1.2.2 Les batteries	_____	11

I.2.1.2.3	Principe de fonctionnement des batteries	11
I.2.1.2.4	Caractéristiques d'une batterie	11
I.2.1.2.5	Moteurs	12
I.2.1.2.6	Moteurs à courant continu	12
I.2.1.2.7	Moteur à courant alternatif	12
I.2.1.2.8	Les pompes	13
I.2.2	Convertisseurs statiques	15
I.2.2.1	Convertisseur DC/DC (Hacheur)	15
I.2.2.1.1	Convertisseur Buck (hacheur série)	15
I.2.2.1.2	Convertisseur Boost (hacheur parallèle)	15
I.2.2.1.3	Convertisseur Buck-Boost	16
I.2.2.1.4	Convertisseur DC/AC (Onduleur)	16
<b>I.3</b>	<b>Conclusion</b>	<b>16</b>

## **CHAPITRE II           Modélisation d'un système de pompage photovoltaïque**

<b>II</b>	<b>Introduction</b>	<b>18</b>
<b>II.1</b>	<b>Modélisation du générateur photovoltaïque</b>	<b>18</b>
II.1.1	La cellule photovoltaïque	18
II.1.1.1	Paramètres d'une cellule photovoltaïque	18
II.1.2	Modèles mathématiques	20
II.1.2.1	Cellule idéale	20
II.1.2.2	Modèle à une diode	21
II.1.3	Modélisation sous Matlab/Simulink du modèle à une diode	22
II.1.3.1	Paramètres du panneau utilisé	22
II.1.3.2	Caractéristique $I_{pv}$ - $V_{pv}$ et $P_{pv}$ - $V_{pv}$ du générateur photovoltaïque	23
II.1.3.3	Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques	24
II.1.3.4	Influence de la température sur les caractéristiques	25
II.1.4	Méthode voltampère-métrique	26
II.1.4.1	Résultats expérimentaux	27
II.1.5	Effet de l'ombrage sur les caractéristiques $P_{pv}$ - $V_{pv}$ et $I_{pv}$ - $V_{pv}$	30
II.1.5.1	Remarques	33
II.1.6	Point de puissance maximale	33
II.1.6.1	Mode de fonctionnement	33
II.1.6.2	Avantage d'un régulateur de charge MPPT	34
II.1.6.3	Méthode de perturbation et d'observation (P&O)	34
II.1.6.3.1	Algorithme de la méthode P&O	35
II.1.6.4	Autres méthodes	36
II.1.7	Modélisation des convertisseurs	36
II.1.7.1	Modélisation d'un hacheur survolteur – BOOST	36
II.1.7.2	Modélisation de l'onduleur de tension monophasé	37
II.1.8	Modélisation et simulation de la batterie	38
<b>II.2</b>	<b>Modélisation de la machine asynchrone à condensateur de démarrage</b>	<b>38</b>
II.2.1	Constitution	39

II.2.2	Equations électriques de la machine	40
II.2.2.1	Expression des grandeurs du rotor dans le référentiel lié du stator	42
II.2.2.2	Détermination du couple électromagnétique	43
II.2.2.3	Equation mécanique de la machine	43
<b>II.3</b>	<b>Modélisation de la pompe centrifuge</b>	<b>44</b>
II.3.1	Le Débit	44
II.3.2	La hauteur manométrique totale	44
II.3.3	Niveau statique	44
II.3.4	Niveau dynamique	44
II.3.5	La puissance hydraulique	45
<b>II.4</b>	<b>Dimensionnement du système</b>	<b>45</b>
II.4.1.1	Puissance hydraulique	45
II.4.1.2	Puissance mécanique	45
II.4.1.3	Constante hydraulique	45
II.4.1.4	Dimensionnement du moteur asynchrone	46
II.4.1.5	Puissance demandée par les modules	46
II.4.1.6	Temps de pompage nécessaire	46
II.4.1.7	Energie électrique journalière demandée	46
II.4.1.8	Dimensionnement des panneaux	46
II.4.1.9	Nombre de panneaux	47
II.4.1.10	Nombre de panneaux en série	47
II.4.1.11	Nombre de panneaux en parallèle	47
II.4.1.12	Dimensionnement des batteries	47
II.4.1.13	Capacité des batteries	47
II.4.1.14	Nombre des batteries	47
II.4.1.15	Nombre de batteries en série - parallèle	47
II.4.2	Dimensionnement des câbles	48
II.4.2.1	Section des câbles entre le panneau et la boîte de jonction	48
II.4.2.2	Section des câbles entre la boîte de jonction et le régulateur DC/DC	48
II.4.2.3	Section des câbles entre le régulateur DC/DC et les batteries et entre les batteries et l'onduleur	49
II.4.2.4	Section des câbles entre l'onduleur et la charge	49
II.4.3	Récapitulatif du dimensionnement	50
<b>II.5</b>	<b>Simulation de la machine asynchrone monophasée et la pompe</b>	<b>51</b>
II.5.1	Simulation de la machine asynchrone monophasée	51
II.5.2	Simulation de la pompe	54
<b>II.6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>55</b>
<b>CHAPITRE III                    Gestion du système de pompage photovoltaïque</b>		
<b>III</b>	<b>Introduction</b>	<b>56</b>
III.1	But de la gestion utilisée	56
III.2	Explication des différentes étapes principales de la gestion	56

III.3	Modes réalisés	57
III.4	Organigramme	58
III.5	Simulation du programme et interprétation des résultats	59
III.6	Profils utilisés	59
III.7	Composants du système	60
III.8	Différentes caractéristiques obtenues avec les profils réels	60
III.9	Simulation avec des profils théoriques	61
III.10	Caractéristiques obtenues avec les profils théoriques	62
III.11	Simulation de la gestion d'énergies	64
III.12	Conclusion	64
<b>Conclusion générale</b>		<b>65</b>
<b>Références bibliographiques</b>		

## Nomenclature (Abréviations et symboles)

<b>AC</b>	Courant alternatif.
<b>DC</b>	Courant continu.
<b>PPMG</b>	Point de puissance maximal globale.
<b>PPML</b>	Points de puissance maximal local.
<b>MPP</b>	Maximum power point.
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking.
<b>P&amp;O</b>	Perturbation et d'observation.
<b>PV</b>	Photovoltaïque.
<b>A</b>	Coefficient d'idéalité de la diode.
<b><math>\alpha</math></b>	Le rapport cyclique.
<b>Aut</b>	Autonomie (en jours).
<b><math>\beta</math></b>	Coefficient qui vaut 1 en triphasé et 2 en monophasé.
<b><math>C_{batt}</math></b>	Capacité de la batterie (Ah).
<b><math>C_{batt-unitaire}</math></b>	Capacité d'une batterie unitaire.
<b><math>C_H</math></b>	Constante hydraulique.
<b><math>\cos\delta</math></b>	Facteur de puissance ( $\delta$ est le déphasage entre le courant et la tension alternatifs);
<b>D1, D2, D3, D4</b>	Diode de roue libre.
<b>E</b>	Tension Continue (V).
<b><math>E_b</math></b>	La force électromotrice en fonction de l'état de charge de la batterie.
<b><math>E_{stc}</math></b>	Ensoleillement de référence (W/m <sup>2</sup> ).
<b><math>E_s</math></b>	L'ensoleillement (W/m <sup>2</sup> ).
<b><math>f_s</math></b>	Fréquence de pulsation s (Hz).
<b>FF</b>	Facteur de Forme.

<b><i>f<sub>mm</sub></i></b>	Force magnétomotrice (A).
<b><i>f<sub>v</sub></i></b>	Coefficient de frottement.
<b><i>G</i></b>	Source de courant parfaite (A).
<b><i>g</i></b>	Accélération de la pesanteur (9.81 m/s <sup>2</sup> ).
<b><i>g</i></b>	Glissement.
<b><i>Hg</i></b>	Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation (m).
<b><i>HMT</i></b>	Hauteur manométrique (m).
<b><i>I</i></b>	Courant électrique (A).
<b><i>I<sub>B</sub></i></b>	Courant maximal d'emploi (A).
<b><i>I<sub>bat</sub></i></b>	Courant de la batterie (A).
<b><i>I<sub>cc</sub></i></b>	Courant de court-circuit de la cellule (A).
<b><i>I<sub>d</sub></i></b>	Courant de la diode (A).
<b><i>I<sub>ppm</sub></i></b>	Courant de point de puissance maximale (A).
<b><i>I<sub>s</sub></i></b>	Courant de saturation de la diode (A).
<b><i>I<sub>sh</sub></i></b>	Le courant shunt (A).
<b><i>I<sub>ph</sub></i></b>	Courant produit par la photopile (A).
<b><i>I<sub>pv</sub></i></b>	Courant photovoltaïque (A).
<b><i>J</i></b>	Moment d'inertie du rotor et de toute charge (Kg.m <sup>2</sup> ).
<b><i>K</i></b>	Constante de Boltzmann 1.38. 10 <sup>-23</sup> (J/K).
<b><i>K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>, K<sub>4</sub></i></b>	Transistor de puissance.
<b><i>K<sub>T</sub></i></b>	Coefficient de température de la capacité (température de fonctionnement des batteries est de -10°).
<b><i>L</i></b>	Longueur du câble (m).
<b><i>L<sub>n</sub>, L<sub>p</sub></i></b>	Longueurs de diffusion des électrons et trous.
<b><i>M<sub>d</sub>, M<sub>q</sub></i></b>	Les mutuelles inductances maximales.
<b><i>N<sub>batt</sub></i></b>	Nombre de batteries.
<b><i>N<sub>batt-série</sub></i></b>	Nombre de batteries en série.
<b><i>N<sub>batt-paral</sub></i></b>	Nombre de batteries en parallèle.
<b><i>N<sub>oct</sub></i></b>	La température nominale de fonctionnement de la cellule solaire.

$N_{PV}$	Nombre de panneaux photovoltaïques.
$N_{PVs}$	Nombre de panneaux photovoltaïques en série.
$N_{PVp}$	Nombre de panneaux photovoltaïques en parallèle.
$N_s$	Vitesse de synchronisme (tr/min).
$N_r$	Vitesse de rotation (tr/min).
$P$	Puissance électrique (W).
$p$	Le nombre de paires de pôles.
$P_{DD}$	La profondeur de décharge profonde (%).
$P_{dem}$	Puissance demandée (W).
$P_1, P_2, P_3, P_4$	Paramètres constants.
$P_{hyd}$	Puissance communiquée au fluide par la pompe (W).
$P_{in}$	La puissance du flux lumineux incident (W).
$P_{mec}$	Puissance mécanique requise par la pompe (W).
$\Delta P$	Puissance électrique nette (W).
$P_{pert}$	Pertes de charge produites par le frottement d'eau sur les parois des conduites.
$P_{ppm}$	Puissance au Point de puissance maximale (W).
$P_{pv}$	Puissance photovoltaïque (W).
$q$	Charge d'un électron ( $1.6 \cdot 10^{-19}$ C).
$qe$	Quantité d'électricité (C).
$Qv$	Débit volumique (m <sup>3</sup> /s).
$R_i$	La résistance interne, variable en fonction de l'état de charge.
$R_s$	Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours ( $\Omega$ ).
$R_{sh}$	Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule ( $\Omega$ ).
$S$	La surface effective des cellules (m <sup>2</sup> ).
$SOC$	State of charge (état de charge) (%).
$T_a$	Température ambiante (°C).
$T_{cref}$	Température de référence (°C).
$T_j$	Température de la jonction (°C).

$T_p$	Temps de pompage (h).
$T_r$	Le couple de charge (N.m).
$U$	Tension (V).
$V$	Quantité d'eau requise (m <sup>3</sup> ).
$V_{batt}$	Tension de la batterie (V).
$V_{oc}$	Tension circuit ouvert (V).
<b>VDC</b>	Tension de charge de batterie (V).
$V_{ppm}$	Tension de point de puissance maximale (V).
$V_{pv}$	Tension aux bornes de la cellule (V).
$V_s$	Tension de sortie onduleur alternatif monophasé (V).
$V_{th}$	Tension thermique (V).
$\Delta v$	Chute de tension, $\Delta v = 0.01$ (V).
$\theta$	Angle de glissement (°).
$\Omega_r$	Vitesse rotorique du moteur (rad/s).
$\varphi$	Masse volumique d'eau (1000 kg/m <sup>3</sup> ).
$\eta_p$	Rendement de pompe (%).
$\eta_m$	Rendement du moteur (%).
$\eta_{ond}$	Rendement de l'onduleur (%).
$\rho$	Résistivité du matériau conducteur (cuivre ou aluminium) en service normal.
$\phi_{s1}, \phi_{s2}, \phi_{r1}, \phi_{r2}$	Les flux totaux statoriques et rotoriques à travers les bobines des enroulements.

# Liste des figures

## Figures chapitre I

Figure I-1 Panneaux photovoltaïques.	3
Figure I-2 Schéma explicatif de l'effet photovoltaïque.	4
Figure I-3 Association des panneaux en série.	6
Figure I-4 Association des panneaux en parallèle.	6
Figure I-5 Association des panneaux en série/parallèle.	7
Figure I-6 Système de pompage photovoltaïque .	10
Figure I-7 Pompe centrifuge.	14
Figure I-8 Pompe volumétrique.	14
Figure I-9 Convertisseur Buck..	15
Figure I-10 Convertisseur Boost.	16
Figure I-11 Convertisseur Buck-Boost.	16
Figure II-1 Architecture du système de pompage photovoltaïque à étudier.	18
Figure II-2 : Modèle d'une cellule photovoltaïque idéal.	20
Figure II-3 : schéma électrique équivalent du modèle à une diode.	21
Figure II-4 Schéma bloc sous Matlab/Simulink du panneau utilisé.	22
Figure II-5 Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ .	23
Figure II-6 Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ .	24
Figure II-7 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv}$ .	24
Figure II-8 Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv}$ .	25
Figure II-9 Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}$ .	25
Figure II-10 Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}$ .	26
Figure II-11 Mise en pratique de la méthode voltampère-métrique.	26
Figure II-12 Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ .	27
Figure II-13 Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ .	27
Figure II-14 Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ .	28
Figure II-15 Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ .	28
Figure II-16 Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ .	29
Figure II-17 Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ .	29
Figure II-18 Différents types d'ombrages appliqués ( Sable à gauche / Feuilles d'arbres à droite).	30
Figure II-19 Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ avec un ombrage partiel au sable.	31
Figure II-20 Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ avec un ombrage partiel au sable.	31
Figure II-21 Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ avec un ombrage total au sable.	31
Figure II-22 Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ avec un ombrage total au sable.	31
Figure II-23 Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ avec un ombrage partiel au feuilles d'arbre.	32
Figure II-24 Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ avec un ombrage partiel au feuilles d'arbre.	32
Figure II-25 Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ avec un ombrage total au feuilles d'arbre.	32
Figure II-26 Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ avec un ombrage total au feuilles d'arbre.	33
Figure II-27 Caractéristique $P_{pv}$ d'un panneau photovoltaïque.	34
Figure II-28 Organigramme de la méthode P&O.	35
Figure II-29 Circuit électrique d'un hacheur BOOST.	36
Figure II-30 Schéma électrique d'un onduleur monophasé en pont H.	37
Figure II-31 Schéma équivalent du modèle électrique.	38
Figure II-32 Représentation schématique du moteur asynchrone monophasé à condensateur de démarrage	39
Figure II-33 Schéma référentiel de la machine dans le système (d,q) lié au stator.	40
Figure II-34 Débit de la pompe.	44
Figure II-35 Couple moteur à vide.	51
Figure II-36 Courant statorique du moteur à vide.	51
Figure II-37 Vitesse angulaire du moteur à vide.	52

Figure II-38 Couple résistant.	52
Figure II-39 Couple moteur en charge.	53
Figure II-40 Courant statorique du moteur en charge.	53
Figure II-41 Vitesse angulaire du moteur en charge.	53
Figure II-42 Débit de la pompe.	54
Figure II-43 Puissance hydraulique de la pompe.	54
Figure II-44 Puissance mécanique de la pompe.	54
Figure III-1 Système de pompage photovoltaïque avec stockage.	56
Figure III-2 Illustration explicative de la gestion de notre système.	57
Figure III-3 Organigramme de la gestion d'énergie.	58
Figure III-4 Schéma bloc du système global à simuler.	59
Figure III-5 Profil réel de température utilisé.	59
Figure III-6 Profil réel de l'ensoleillement utilisé.	60
Figure III-7 Les différentes puissances obtenues.	60
Figure III-8 Tension de batteries $V_{batt}$ .	61
Figure III-9 Etat de charge des batteries SOC.	61
Figure III-10 Profil d'ensoleillement.	61
Figure III-11 Profil de température.	61
Figure III-12 Variations du niveau d'eau dans le réservoir.	62
Figure III-13 Les différentes puissances obtenues.	62
Figure III-14 Tension de batteries $V_{batt}$ .	63
Figure III-15 Etat de charge des batteries SOC.	63
Figure III-16 Différents modes obtenus dans la gestion d'énergie.	64

## Liste des tableaux

### **Tableaux chapitre II**

<i>Tableau II-1 Caractéristique du panneau utilisé.</i>	23
<i>Tableau II-2 Paramètres du panneau utilisé.</i>	23
<i>Tableau II-3: Dimensionnement des batteries.</i>	50
<i>Tableau II-4 Dimensionnement du système pompage photovoltaïque.</i>	50

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction générale

« Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme », Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794).

Les besoins en énergie en toutes ses formes ont considérablement augmenté et ne cessent de croître depuis des décennies, et cela est confronté à plusieurs obstacles comme les énergies fossiles qui se font de plus en plus rares à cause de leur épuisement, ainsi que les problèmes climatiques causés par les gaz à effet de serre. Ce qui a conduit le monde à se tourner vers les énergies dites vertes en raison de leurs natures renouvelables et propres, pour but de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et subvenir aux besoins énergétiques de l'homme [22].

Ces énergies renouvelables comme l'énergie photovoltaïque, l'éolien, et l'énergie hydraulique sont les plus utilisés et sont considérées comme une solution incontestable pour tous ces problèmes rencontrés durant ce 21<sup>ème</sup> siècle. Elles sont renouvelables du fait qu'elles soient inépuisables, gratuites et surtout non polluantes, et le développement de ces technologies devient une priorité dans plusieurs pays dans le monde [6].

Par ailleurs nous savons que les ressources en eau sont essentielles aux demandes quotidiennes de l'homme pour différentes applications, mais ces dernières sont perturbées dans les régions et pays arides, où les pénuries d'eau ne sont pas sans conséquences sur la vie des populations de ces régions-là. Ce qui rend urgent et indispensable l'approvisionnement en eau potable. De ce fait les systèmes de pompage d'eau sont un élément clé pour remédier à ces pénuries. Cependant l'énergie solaire est abondante durant toute l'année dans ces régions, ce qui nous permet de faire appel à l'énergie photovoltaïque afin d'assurer la continuité de fonctionnement de ces systèmes [22].

Ce procédé sera traité dans ce travail à travers trois chapitres, dont l'objectif est d'étudier ces systèmes de pompage photovoltaïque. Or cela consiste à produire de l'énergie électrique avec un générateur photovoltaïque associé à des batteries afin d'alimenter une pompe à eau et effectuer le pompage d'une manière continue et optimale même en absence d'irradiation solaire.

Le premier chapitre est consacré à présenter les généralités nécessaires afin de se familiariser avec les énergies renouvelables, le photovoltaïque plus précisément, ainsi que leurs avantages, inconvénients, et comporte également tous les détails essentiels sur tous les composants utilisés durant ce travail.

Le deuxième chapitre comporte la modélisation et un dimensionnement précis de toute l'installation puis une simulation sous Matlab/Simulink de l'ensemble des éléments principaux de ce système de pompage photovoltaïque,

Le troisième chapitre fait office d'une présentation complète d'une gestion d'énergie du système de pompage photovoltaïque avec batteries, qui permet de satisfaire la charge de la pompe et de protéger les batteries. Et sa simulation sur Matlab/Simulink afin de visualiser les différents modes et caractéristiques obtenues via des profils d'ensoleillement et de température réels et théoriques.

Et pour finir un récapitulatif du travail à travers une conclusion générale sera présenté à la fin, accompagné de quelques perspectives.

# **CHAPITRE I**

## **Généralités sur les systèmes de pompage photovoltaïque**

## I Introduction

Ce chapitre consiste à présenter les généralités concernant les énergies renouvelables, l'énergie solaire plus précisément, à étudier la technologie des panneaux photovoltaïques, leurs applications, ainsi que certains problèmes qui peuvent être rencontrés liés à leur utilisation en apportant des solutions pour y remédier. Pour finir par présenter le domaine du pompage photovoltaïque par ses différents types, ainsi que la description de chacun des principaux composants de ce système.

### I.1 L'énergie solaire

L'énergie solaire est provoquée par une fusion nucléaire qui se produit au cœur du soleil. Elle est diffusée dans le système solaire et dans l'univers sous forme de photons, par des rayonnements électromagnétiques de longueurs d'ondes allant de  $0,22\mu\text{m}$  à  $10\mu\text{m}$  contenant tout le spectre lumineux, visible et invisible à l'œil humain [14].

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

La terre reçoit une puissance moyenne de  $1367\text{ W/m}^2$  du rayonnement solaire, une partie de cette puissance est absorbée par l'atmosphère, généralement l'énergie atteignant la surface ne dépasse pas  $1200\text{ W/m}^2$ . D'autres facteurs ont aussi une influence sur la variation de celle-ci, comme la rotation et l'inclinaison de la terre, l'heure et la saison.

#### I.1.1 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque, découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839, est un phénomène physique propre aux matériaux semi-conducteurs qui génèrent de l'électricité en étant exposés à la lumière. On prend comme exemple le silicium cristallin qui est l'un de ces matériaux semi-conducteurs les plus utilisés dans les panneaux photovoltaïques [37].

#### I.1.2 Quelques avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

##### Avantages :

- C'est une source d'énergie renouvelable inépuisable à l'échelle humaine ;
- L'énergie solaire peut soit réduire drastiquement, soit éliminer totalement vos factures d'électricité ;
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu ;
- Particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux [14].

##### Inconvénients :

- L'énergie solaire est une source d'énergie intermittente ;
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % ;
- L'installation nécessite beaucoup d'espace ;
- Le prix des installations qui peut être élevé ;

- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes [14].

### I.1.3 Les panneaux photovoltaïques

Un panneau photovoltaïque ou module photovoltaïque, est constitué de plusieurs cellules en série ou en parallèle afin d'obtenir une tension souhaitée [3], et produit de l'électricité par effet photovoltaïque en réagissant à la lumière du soleil. Plus un panneau est irradié plus il produit d'électricité



Figure I-1 Panneaux photovoltaïques.

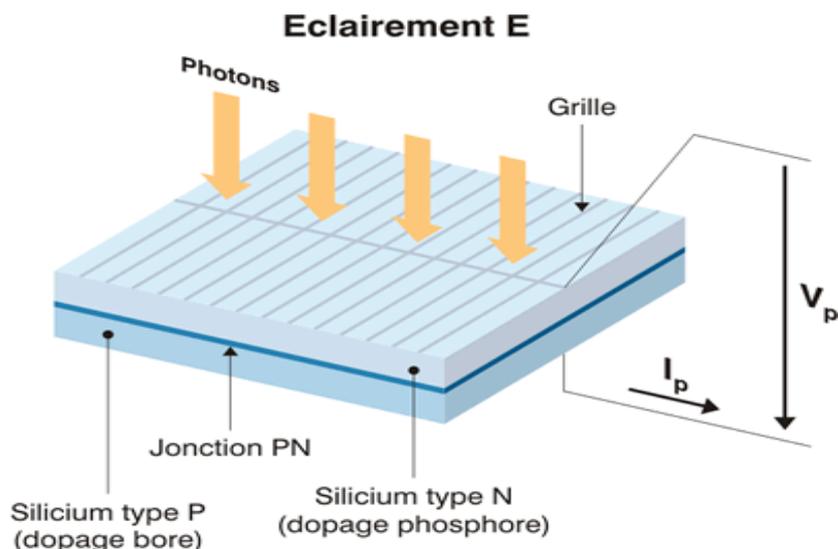
### I.1.4 La cellule photovoltaïque

Les cellules solaires sont des dispositifs semi-conducteurs qui convertissent l'énergie lumineuse en énergie électrique, et sont généralement faites de silicium sous ses différentes formes. Elles ne font recours à aucun liquide et ne contiennent pas de substances corrosives ni de pièces mobiles. Elles sont pratiquement sans entretien et ne polluent pas, et ne génèrent pas de bruit. Par conséquent, les cellules solaires sont le moyen le plus sûr et le plus écologique pour produire de l'énergie [4].

#### I.1.4.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La structure de base d'une cellule photovoltaïque est une jonction PN (Figure I-2) constituée de la manière suivante : un cristal semi-conducteur dopé P est recouvert d'une zone mince dopée N (quelques millièmes de mm). Entre les deux zones se développe une jonction. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. L'épaisseur totale du cristal est de l'ordre du millimètre.

Il est à noter que les cellules photovoltaïques peuvent être réalisées à partir des diodes Schottky (métal déposé sur un semi-conducteur de type P ou N). Réciproquement, le fonctionnement d'une jonction P+N (dont le semi-conducteur de type P est fortement dopé) est analogue à celui d'une diode Schottky. Un rayon lumineux qui frappe le dispositif peut pénétrer dans le cristal à travers la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode. Le dessus et le dessous de la cellule doivent alors être recouverts de contacts métalliques pour collecter l'électricité générée [5].



**Figure I-2** Schéma explicatif de l'effet photovoltaïque.

La puissance électrique produite par une cellule industrialisée est très faible typiquement de 1 à 3W avec une tension de moins d'un volt. Le rendement de conversion des cellules commercialisées atteint actuellement 15 à 19% pour le silicium monocristallin, 12 à 16 % pour le silicium poly cristallin, 7 à 9% pour le silicium amorphe. Pour élever la tension, les cellules sont commercialisées sous forme des modules photovoltaïques connectés en série.

#### I.1.4.2 Quelques types de cellules photovoltaïque

Il existe plusieurs types de cellules ayant des caractéristiques diverses et variées, appropriées à une fonction ciblée.

Voici quelques exemples de cellules photovoltaïques utilisées de nos jours :

##### I.1.4.2.1 Les cellules monocristallines :

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération. Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Elles ont un bon rendement, mais la méthode de production est laborieuse.

- **Avantages :**
  - Très bon rendement avec un bon éclaircissement.
- **Inconvénients :**
  - Coût élevé, Rendement faible sous un faible éclaircissement.

##### I.1.4.2.2 Les cellules poly cristallines :

Les cellules poly cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 13%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est bleu, mais n'est pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux [6].

- **Avantages :**
  - Bon rendement 13%, mais cependant moins bon que le monocristallin.
  - Moins cher que le monocristallin.
  - Sensibilité accrue aux rayonnements directs.
- **Inconvénients :**
  - Rendement faible sous un faible éclairement.
  - Forte sensibilité à la température.

### I.1.4.2.3 Les cellules amorphes :

Ces cellules sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est disposé une fine couche de silicium (l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal). Leur rendement est de l'ordre de 5 à 10%, plus bas que celui des cellules cristallines. Elles sont appliquées dans les petits produits de consommation (montres, calculatrices) mais sont peu utilisées dans le cadre des installations solaires [6].

- **Avantages :**
  - Fonctionnent avec un éclairement faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).
  - Moins chères que les autres.
  - Non toxique comparé à certains semi-conducteurs.
- **Inconvénients :**
  - Rendement faible en plein soleil (environ 6%).
  - Performances qui diminuent sensiblement avec le temps.

### I.1.5 Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque est un système complet assurant la production et la gestion de l'électricité fournie par panneaux photovoltaïques. L'énergie est ensuite stockée dans des accumulateurs et/ou transformée en courant alternatif suivant le type d'application [20].

### I.1.6 Champ photovoltaïque

C'est un regroupement de modules solaires photovoltaïques raccordés entre eux et destiné à produire de l'électricité, soit à titre autonome (panneaux solaires sur les toits des habitations par exemple), soit dans le cadre d'un raccordement à un réseau public de distribution d'électricité [16].

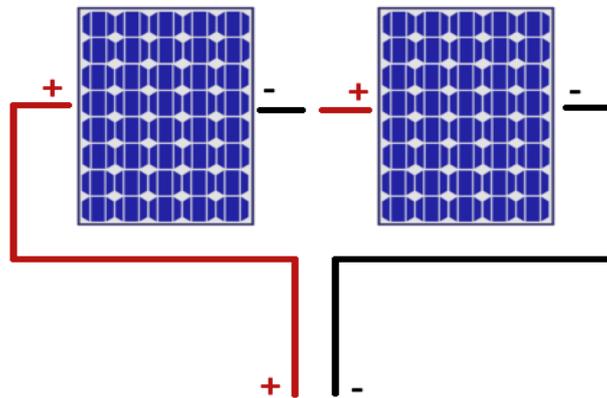
### I.1.7 Association série parallèle des panneaux photovoltaïques

Dans certains systèmes photovoltaïques, on a besoin de plusieurs modules pour satisfaire les besoins en énergie, et ces derniers sont reliés les uns avec les autres. On a deux façons de les brancher : en série ou en parallèle. Ces deux cas sont bien différents, et on les utilise en fonction des besoins [1].

#### I.1.7.1 Branchement en série :

En reliant des cellules ou des modules en série, le courant de la branche est le même tandis que la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.

Branchement de panneaux en série



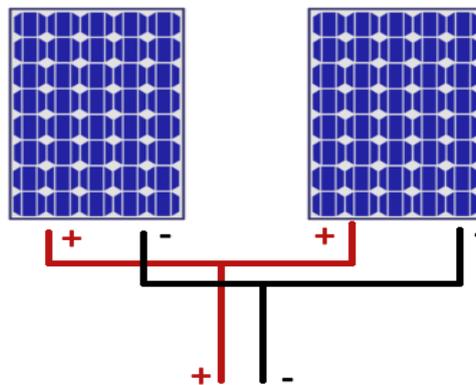
**Figure I-3** Association des panneaux en série.

Dans ce cas, les tensions  $V$  s'additionnent, et c'est l'intensité la plus faible qui prime dans le cas de panneaux solaires différents ou si l'un d'autre eux est sous l'ombre donc il va perdre en intensité.

#### I.1.7.2 Branchement en parallèle :

En additionnant les modules en parallèle, la tension de la branche est la même tension de chaque module, mais le courant augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle utilisés dans la branche.

Branchement de panneaux en parallèle



**Figure I-4** Association des panneaux en parallèle.

Ce branchement n'est possible qu'avec des panneaux de mêmes tensions

Contrairement au branchement en série, il n'est pas possible d'avoir des panneaux de différentes tensions.

Dans ce branchement c'est donc l'intensité qui s'additionne. C'est le branchement idéal lorsque l'on a besoin d'une plus grosse intensité. C'est également le bon montage lorsqu'il peut y avoir un ombrage sur les panneaux photovoltaïques [1].

### I.1.7.3 Branchement série/parallèle :

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est-à-dire Série-Parallèle.

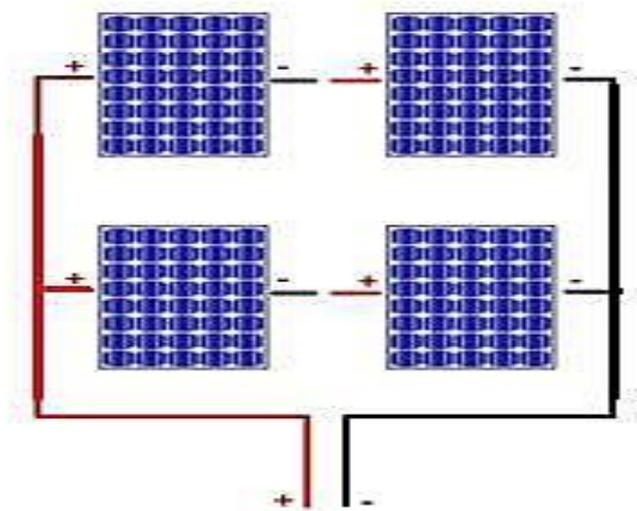


Figure I-5 Association des panneaux en série/parallèle.

## I.1.8 Les systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques sont classés en trois différents types : autonomes, hybrides et reliés au réseau.

Le type choisit dépendra principalement des besoins, de l'emplacement et de budget.

### I.1.8.1 Les systèmes autonomes

Les systèmes autonomes sont indépendants des autres sources d'énergie. Ils ont pour but d'alimenter les maisons, les chalets ou les régions isolées et éloignées des villes, ainsi qu'à de multiples applications le pompage de l'eau. Et ces systèmes peuvent être installé avec ou sans stockage électrochimique [2].

#### I.1.8.1.1 Les systèmes autonomes sans stockage

Dans ce cas, l'appareil alimenté n'est en marche qu'en présence d'une puissance photovoltaïque générée suffisante pour son démarrage. C'est utilisé pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner pendant l'absence de l'éclairage solaire, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de celui-ci seulement. Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de systèmes autonome [7].

#### I.1.8.1.2 Les systèmes autonomes avec stockage électrochimique

C'est les systèmes les plus courante de leur catégorie, ils comportent des batteries qui stockent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque durant de la journée. Afin d'assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours sans ensoleillement des appareils électriques utilisés.

### I.1.8.2 Les systèmes photovoltaïques hybrides

On parle de système hybride de production de l'énergie, c'est lorsqu'on combine plusieurs sources d'énergie [7]. Les systèmes photovoltaïques hybrides intègrent un générateur photovoltaïque et un autre générateur : éolienne, groupe électrogène... et même parfois le réseau public d'électricité [1].

### I.1.8.3 Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau électrique public. Généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement [2].

Ce raccordement s'effectue sous certaines conditions, car il est important d'adapter la tension continue sortante du générateur photovoltaïque à la tension alternative du réseau à l'aide d'un onduleur.

### I.1.9 Différentes applications des systèmes photovoltaïques

- L'éclairage (autoroutes, arrêts d'autobus...).
- Les communications (Stations de relais de téléphone, bornes d'appel d'urgences sur autoroutes, téléphones mobiles, ...).
- La fourniture d'électricité pour des sites éloignés du réseau normal (forêts, montagnes...).
- Capteurs isolés (infos météorologique, enregistrements sismiques, recherche scientifique).
- Chargement des batteries de voitures (les batteries normales, ou de voitures électriques,).
- Pour de petites stations de pompage ou d'irrigation [7].

### I.1.10 Problèmes liés aux panneaux solaires

Parfois on peut constater que notre production d'électricité a diminué tandis que tous les composants de notre système semblent fonctionner correctement, le problème de nos panneaux solaires peut alors provenir :

- **D'un problème d'étanchéité** : Les panneaux sont peut-être endommagés par des infiltrations.
- **Panneau solaire endommagé** : Les panneaux solaires sont conçus pour résister aux aléas climatiques, y compris les fortes grêles. Cependant, ceux-ci peuvent être abîmés à la suite d'un choc trop violent.
- **Panneau solaire qui prend feu** : Les panneaux solaires en eux-mêmes ne peuvent pas provoquer d'incendie. En revanche, il peut arriver, dans de très rares cas et uniquement si l'installation n'est pas correctement effectuée, qu'un feu se déclare.
- **Panneau solaire encrassé** : Dans certaines régions, les panneaux photovoltaïques peuvent s'encrasser en raison de la poussière intensive, etc.
- **D'un simple souci d'ombrage** : Notre installation peut être partiellement ombragée par des feuilles ou des branches, ou bien un bâtiment du voisinage.

### I.1.11 L'ombrage des panneaux photovoltaïques

Une ombre signifie qu'un voile empêche l'arrivée de la lumière du soleil sur les cellules photovoltaïques. Si une cellule est sous l'ombre, sa production de courant est dégradée voire nulle. Les cellules photovoltaïques d'un panneau solaire sont connectées en série. La cellule qui produit le moins impose son courant à toutes les cellules du panneau.

### I.1.12 Quelques types d'ombrages

- **L'ombrage partiel :**

C'est un ombrage qui laisse passer en partie les rayons du soleil.

- **L'ombrage total :**

On appelle ombrage total ou complet ce qui vient couvrir le panneau.

- **Ombrage temporaire :**

L'ombrage temporaire résulte de nuages, de déjections d'oiseaux, de poussières ou de feuilles mortes.

- **Auto-ombrage :**

Avec les systèmes de montage en tables, une rangée de modules peut entraîner un ombrage sur la rangée voisine. Dans ce cas de figure, il est nécessaire d'optimiser l'inclinaison et l'espacement entre les rangées de modules.

### I.1.13 Solution pour remédier aux problèmes d'ombrage

- **Le choix de l'onduleur :** Les onduleurs présentant une vaste plage de tension d'entrée peuvent continuer à régler le point de travail optimal même en cas d'ombrage et malgré la perte de tension MPP qui en résulte.
- **Sélection du raccordement de l'installation :** Le raccordement du générateur photovoltaïque influence nettement le rendement énergétique que l'on peut avoir.
- **Le bon emplacement de l'installation :** Le choix de la surface de l'installation est important, afin d'éviter tout éventuel ombrage constant sur les panneaux installés.
- **Introduire un contrôle MPPT :** Pour atténuer l'effet de l'ombrage sur un système photovoltaïque, il est important d'introduire une commande adéquate afin d'assurer le fonctionnement au point de puissance maximale dans toutes les conditions [8].

## I.2 Pompage photovoltaïques

Que ce soit en agriculture, l'alimentation en eau pour les zones ayant des problèmes liés au déficit en eau, ou bien le stockage d'eau pour générer de l'électricité dans le besoin, le pompage photovoltaïque est considéré comme la solution efficace et idéale à ces applications

Ce procédé consiste à produire de l'électricité par des panneaux photovoltaïques pour but d'alimenter une pompe d'eau afin de pomper l'eau des puits ou bassins d'eau souterrains ou en surface, et l'utiliser soit directement, soit la stocker dans des réservoirs situés à une hauteur définie, pour pouvoir l'utiliser ultérieurement pour différentes pratiques et applications.

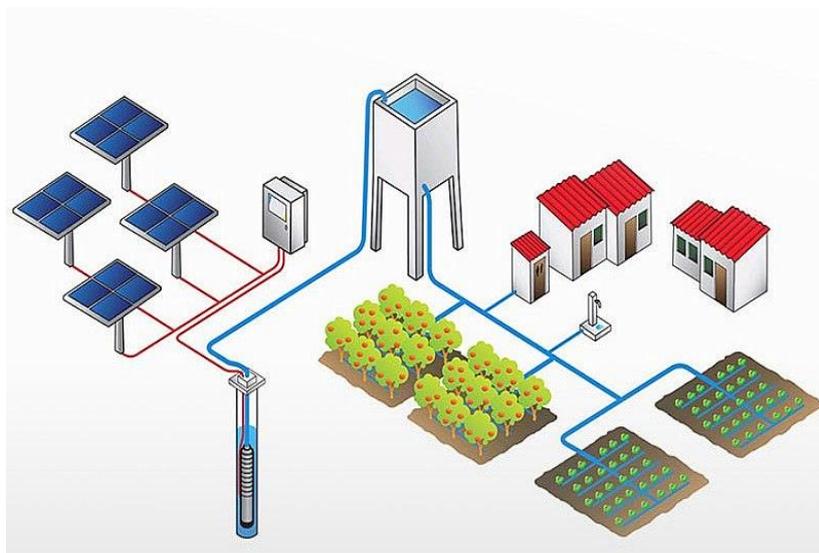


Figure I-6 Système de pompage photovoltaïque [9].

### I.2.1.1 Différents types de pompes photovoltaïques

#### I.2.1.1.1 Le pompage au fil du soleil

Pour des raisons économiques, la plupart du temps on utilise des systèmes fonctionnant au fil du soleil, ce qui veut dire, la pompe est alimentée que durant les heures où l'ensoleillement est suffisamment fort pour pouvoir générer une puissance pouvant satisfaire le besoin de cette pompe. Sachant que la période de la majorité des activités coïncident avec les heures où ce pompage est possible [17].

#### I.2.1.1.2 Le pompage avec stockage hydraulique

Le surplus d'eau pouvant être pompé, on le stocke dans un réservoir en hauteur pour l'utiliser ultérieurement si le pompage photovoltaïque n'est plus possible [17].

#### I.2.1.1.3 Le pompage avec stockage électrochimique

Avec ce système, on stocke l'énergie électrique dans des batteries, et dans ce cas le pompage est possible même en absence du soleil. Cependant ce stockage est l'un des points faibles de ce système, vu la nécessité de changer les batteries en raison de leur durée de vie ainsi que le prix qui peut être assez élevé [17].

### I.2.1.2 Composants d'un système de pompage photovoltaïque

Un système de pompage photovoltaïque est généralement constitué de :

- Générateur photovoltaïque avec ses propres composants.
- Des batteries de stockage d'énergie électrique pour les systèmes qui en utilisent.
- Groupe motopompe qui est composé d'un moteur électrique et d'une pompe.
- La tuyauterie dont a besoin le système [17].

#### I.2.1.2.1 Les différents types de stockages

Dans certains systèmes de pompage photovoltaïque, l'utilisation des batteries de stockage électrochimique est indispensable pour leurs fonctionnements. Généralement, ces

systèmes de pompage nécessitent des tensions de fonctionnement faibles (12 VDC, 24 VDC, etc.).

Egalement, le stockage électrochimique est utilisé pour permettre au système de pompage de fournir de l'eau avec une certaine pression constante impossible de l'assurer avec la méthode gravitationnelle du réservoir d'eau [7].

#### **I.2.1.2.2 Les batteries**

Les batteries sont souvent intégrées au générateur photovoltaïque, elles permettent le stockage de l'électricité pour les systèmes isolés, et restitue la nuit ou les journées nuageuse cette électricité accumulée durant la journée. Il existe différents types de batteries, on peut citer [7] :

- La batterie plomb acide.
- La batterie nickel cadmium.
- La batterie sodium chlorure de nickel.
- La batterie lithium-ion.
- La batterie zinc air

#### **I.2.1.2.3 Principe de fonctionnement des batteries**

Le principe de fonctionnement d'un générateur électrochimique est essentiellement basé sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. Toute réaction chimique d'oxydoréduction, pourvu qu'elle soit spontanée, c'est-à-dire accompagnée d'une diminution d'énergie libre, est en effet susceptible de donner naissance à un courant électrique lorsqu'elle a lieu dans des conditions appropriées.

Pour cela, il faut que l'échange des électrons de valence s'effectue par le canal d'un circuit extérieur au système. Ainsi la combustion libre de l'hydrogène produisant de l'eau et de l'énergie calorifique ne peut donner naissance à un courant électrique car l'échange électronique s'accomplit directement, en quelque sorte par un court-circuitage moléculaire [7].

#### **I.2.1.2.4 Caractéristiques d'une batterie**

Les principales caractéristiques des batteries de stockage pour le solaire photovoltaïque sont [6] :

- Tension nominale : C'est la force électromotrice de l'accumulateur en fonction du couple électrochimique utilisé ;
- Tension de charge : C'est la tension minimale à appliquer pour charger efficacement l'accumulateur ;
- La capacité nominale : C'est la quantité d'énergie que l'on peut stocker dans la batterie, elle s'exprime en ampères-heures (Ah). Elle est donnée dans des conditions de référence (durée de décharge de 20h et température de 25°C) ;
- La profondeur de décharge : C'est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle charge/décharge ;
- Durée de vie : Les contraintes sont si nombreuses qui agissent sur ce paramètre que les constructeurs sont obligés de préciser le mode de fonctionnement pour pouvoir donner des valeurs approximatives ;

- **Autonomie** : Dans le cas du Plomb, il y a usure de l'électrolyte, d'autant plus prononcée que l'on surcharge les batteries. Même au repos, l'évaporation de l'eau est inévitable. Cependant, les constructeurs ont trouvé un moyen de la limiter en utilisant un électrolyte gélifié et des bouchons catalysant la réaction de recombinaison des gaz dans les accumulateurs étanches dits sans entretien.

#### **I.2.1.2.5 Moteurs**

Le moteur du groupe motopompe permet de transformer l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque en énergie mécanique afin d'entraîner la pompe.

On peut trouver des moteurs à courant continu et d'autre à courant alternatif. Mais pour ce dernier type de moteur on aura besoin d'un convertisseur, l'onduleur afin de convertir le courant continu produit par le générateur photovoltaïque en courant alternatif.

#### **I.2.1.2.6 Moteurs à courant continu**

L'énergie électrique appliquée à un moteur est transformée en énergie mécanique en variant le sens du courant circulant dans un induit (habituellement le rotor) soumis à un champ magnétique produit par un inducteur (habituellement le stator). La commutation du courant dans le rotor d'un moteur à courant continu est effectuée à l'aide de balais composés de charbon et de graphite ou par commutation électronique [10].

Ces moteurs sont alimentés par des tensions continues. Ils présentent l'avantage d'être très facilement commandés en régime de vitesse variable et se rencontrent dans la plupart des servomoteurs utilisés pour des fonctionnements de faible puissance (inférieure à 5 kW) [6].

#### **I.2.1.2.7 Moteur à courant alternatif**

Pour les applications de faible et moyenne puissance (jusqu'à quelques kilos Watts), le réseau monophasé standard suffit. Pour des applications de forte puissance, les moteurs à courant alternatif sont généralement alimentés par une source de courants polyphasés. Le système le plus fréquemment utilisé est alors le triphasé (phase décalées de  $120^\circ$ ) utilisé par les distributeurs d'électricité [10].

On a deux types de moteurs à courant alternatif :

- **Les moteurs synchrones**

La machine synchrone est souvent utilisée comme génératrice. On l'appelle alors alternateur, mis à part pour la réalisation de groupe électrogène de faible puissance, cette machine est généralement triphasée. Pour la production d'électricité, les centrales électriques utilisent des alternateurs dont les puissances peuvent avoisiner les 1500 MW.

Comme le nom l'indique, la vitesse de rotation de ces machines est toujours proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent. Ce type de machine peut être utilisé pour relever le facteur de puissance d'une installation [6].

- **Les moteurs asynchrones**

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent.

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. On la retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires), de l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager. Elles étaient à l'origine uniquement utilisées en moteur mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, elles sont de plus en plus souvent utilisées en génératrice. C'est par exemple le cas dans les éoliennes [6].

### **I.2.1.2.8 Les pompes**

Une pompe est une machine servant à véhiculer un fluide qui peut être de l'eau ou autre (pétrole, huile...) en l'aspirant pour le refouler à une certaine pression [10].

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. Outre ces deux classifications, nous distinguons également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée : la pompe à aspiration et la pompe à refoulement.

La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9.8 mètres (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres.

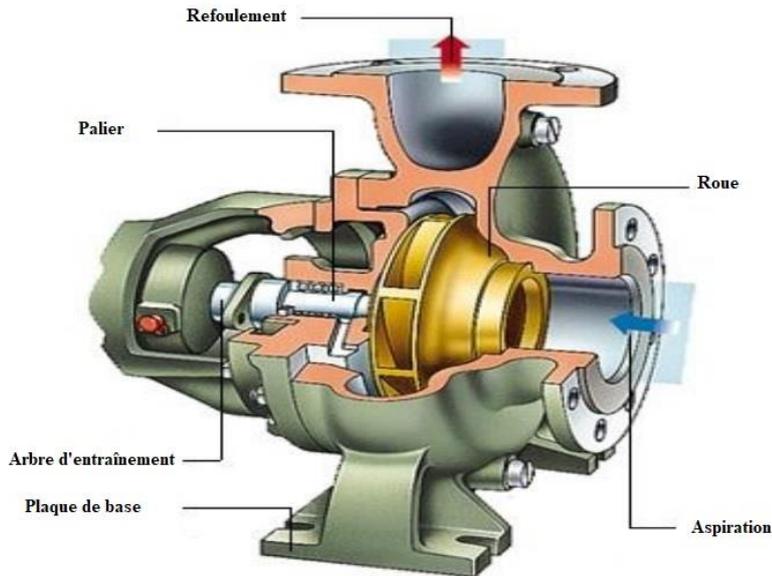
Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-ci. Ces pompes doivent également être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau.

Les pompes à refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface ; la transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, selon la puissance du moteur [6].

- **Pompe centrifuge [35]**

Elles utilisent les variations de vitesse du fluide pompé combinées avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie cinétique transmise au fluide est fournie par la rotation d'une roue munie d'aubes ou d'ailettes, c'est une partie de cette énergie qui est transformée en pression par réduction de vitesse. Les caractéristiques des pompes centrifuges sont particulièrement intéressantes dans le cadre de l'utilisation des modules photovoltaïques :

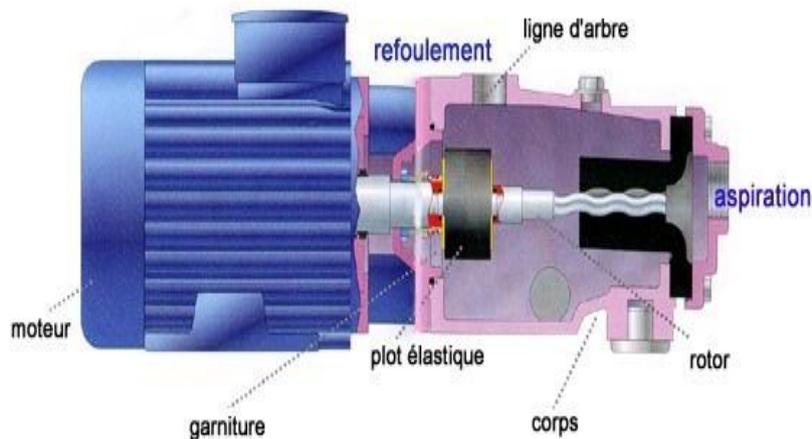
- Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage, la pompe tourne même par très faibles ensoleillements, mais il faut une certaine vitesse du moteur pour que la pression de l'eau soit suffisante pour sortir à l'extrémité du tuyau d'amenée d'eau.
- La puissance absorbée est bien adaptée aux modules photovoltaïques, fournissant un bon rendement



**Figure I-7** Pompe centrifuge [12].

- **La pompe volumétrique**

Les pompes volumétriques encore appelées pompes à cavité progressive utilisent les variations de volume du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. Le fluide est d'abord aspiré par l'accroissement d'un volume puis refoulé par diminution de ce même volume. Les pompes volumétriques utilisées le plus couramment sont les pompes à pistons, à palettes et à engrenages.



**Figure I-8** Pompe volumétrique [13].

Leurs principaux atouts sont les suivants

- Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à  $5 \text{ m}^3 / \text{h}$ ) et aux grandes hauteurs.
- Elles ont de bon rendement, et les pompes de surface ont un amorçage automatique.
- Le couple de démarrage d'une pompe volumétrique est de 3 à 5 fois le couple nominal.

## I.2.2 Convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné en la convertissant. Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement et avec l'apparition des semi-conducteurs, de l'électronique de puissance, des diodes, des transistors et des thyristors etc... Les systèmes de conversion deviennent de plus en plus élaborés et ne nécessitent plus de machines tournantes [10].

### I.2.2.1 Convertisseur DC/DC (Hacheur)

Les convertisseurs DC/DC permettent d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné, ils ont pour fonction de fournir une tension continue variables à partir d'une tension continue fixe. Cette conversion d'énergie s'effectue grâce un "découpage" haute fréquence caractérisée par un rendement élevé. Ces convertisseurs peuvent être de type élévateurs de tension « Boost » ou abaisseur de tension « Buck » ou abaisseur-élévateur « Buck-Boost » [7].

#### I.2.2.1.1 Convertisseur Buck (hacheur série)

Un convertisseur Buck permet de convertir une tension continue en une tension continue d'une faible valeur, c'est un abaisseur de tension, la topologie du convertisseur « Buck » est donnée par la Figure (I-9). Les composants clés sont l'inductance (L), le commutateur (S), la diode (D) et le condensateur (C). Celui-ci se charge par le commutateur (S) et qui maintient la tension à ces bornes jusqu'à l'ouverture de (S) qui fait décharger son énergie à travers la diode sur le charge (R) pour un cycle de période de fonctionnement [7].

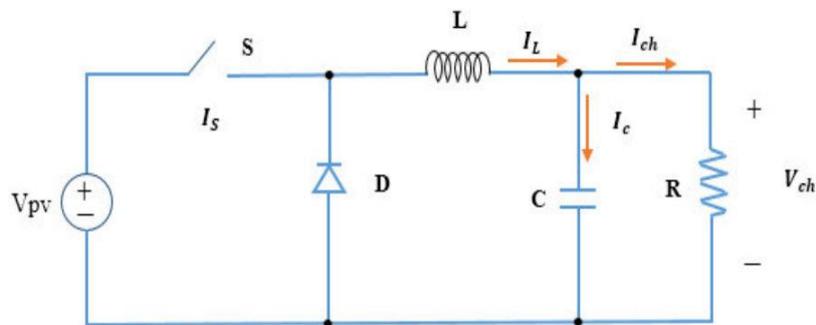


Figure I-9 Convertisseur Buck [7].

#### I.2.2.1.2 Convertisseur Boost (hacheur parallèle)

Un convertisseur élévateur dit Boost permet de convertir une tension d'entrée continue en une autre tension continue aussi en sortie mais de valeur supérieure à celle de l'entrée. C'est pour cela qu'il est dit élévateur de tension. (Voir figure I-10)

L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie. Son fonctionnement se résume : Au premier temps ( $\alpha T$ ), l'interrupteur (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie jusqu'à la fin de la première période.

L'interrupteur (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'oppose à la diminution de courant ( $I_L$ ), génère une tension qui s'ajoutera à la tension de source. Elle sera appliquée sur la charge (R) à travers la diode (D) [7].

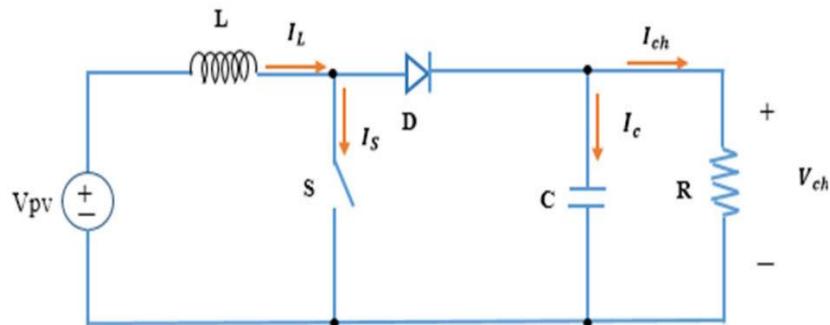


Figure I-10 Convertisseur Boost [7].

### I.2.2.1.3 Convertisseur Buck-Boost

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse (voir figure I-11).

La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Lorsque l'interrupteur (S) est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; tandis que, lorsque le commutateur (S) tourne sur la position (off), la tension à travers l'inductance (L) est renversée, l'énergie stockée et se transfère vers la charge (R) via la diode (D) [7].

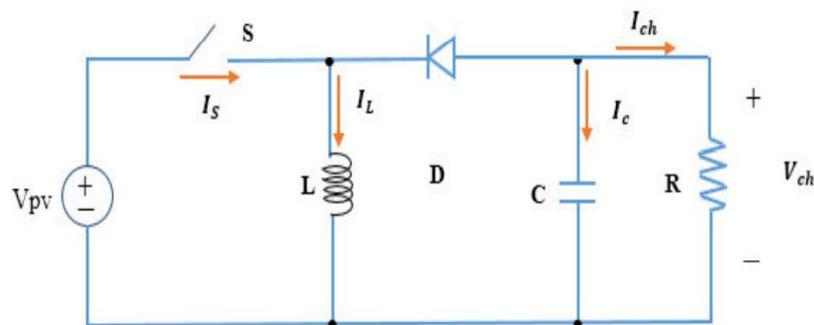


Figure I-11 Convertisseur Buck-Boost [7].

### I.2.2.1.4 Convertisseur DC/AC (Onduleur)

Les onduleurs sont des circuits statiques qui transforment une tension électrique sous forme continue en une tension sous forme alternative, à une valeur désirée de tension et de fréquence. La tension de sortie d'un onduleur a une forme d'onde périodique qui n'est pas sinusoïdale, mais qui peut être très proche de la forme d'onde souhaitée [7].

## I.3 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les généralités concernant le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, ainsi que les différentes configurations des systèmes

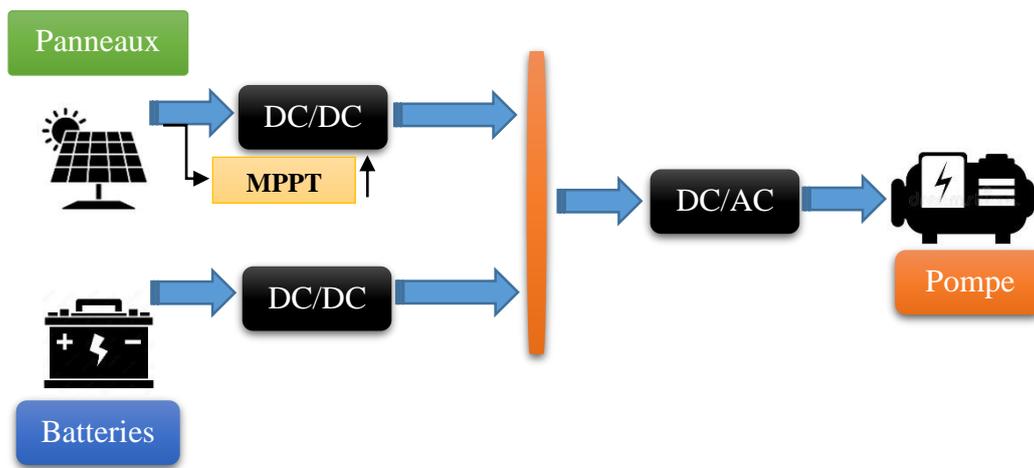
photovoltaïques avec leurs intérêts économiques et environnementaux, ainsi que leurs différentes applications, comme le pompage photovoltaïque. Le prochain chapitre sera consacré à la modélisation et dimensionnement des différents composants de système de pompage PV avec stockage par batterie.

# **CHAPITRE II**

## **Modélisation d'un système de pompage photovoltaïque**

## II Introduction

Après avoir fait le tour des généralités dans le chapitre précédent, concernant l'énergie photovoltaïque, ainsi que ses différentes configurations, et applications comme le pompage photovoltaïque, on passe maintenant à la modélisation de ce dernier à travers ce chapitre 2, en commençant par retrouver les équations mathématiques de chaque composant, pour les modéliser sur Matlab/Simulink afin de mieux comprendre le principe de fonctionnement de ces systèmes-là ainsi que pour effectuer un dimensionnement optimale pour une quelconque installation.



**Figure II-1** Architecture du système de pompage photovoltaïque à étudier.

### II.1 Modélisation du générateur photovoltaïque

#### II.1.1 La cellule photovoltaïque

Un panneau photovoltaïque est constitué de composants électroniques semi-conducteurs appelés cellules photovoltaïques, lorsque celles-ci sont exposées à la lumière, elles produisent de l'électricité. Cette conversion est appelée la conversion photovoltaïque [21].

##### II.1.1.1 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

- **Courant de court-circuit  $I_{cc}$**

Le courant de court-circuit noté  $I_{cc}$ , s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est en court-circuit, autrement dit lorsque le pôle + est relié au pôle - (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule,  $P = U \times I$  est nulle [22] [23].

$$I_{cc} = q \cdot G(L_n + L_p) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit de la cellule (A).

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

$G$  : Source de courant parfaite (A).

$L_n, L_p$  : Respectivement, Longueurs de diffusion des électrons et trous.

- **Tension circuit ouvert  $V_{co}$**

C'est la tension fournie par le panneau photovoltaïque lorsqu'il ne fournit pas d'électricité, donc non relié et aucun courant ne passe.

$$V_{co} = V_{th} \cdot \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s}\right) \quad (\text{II.2})$$

$$V_{th} = \frac{A \cdot K \cdot T_j}{q} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

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

$V_{th}$  : Tension thermique (V).

$A$  : Coefficient d'idéalité de la diode.

$T_j$  : Température de la jonction (°C).

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

- **Température de jonction  $T_j$  de la cellule**

$$T_j = T_a + \frac{N_{oct}-20}{800} \cdot E_s \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$T_a$  : Température ambiante (°C).

$E_s$  : L'ensoleillement (w/m<sup>2</sup>).

$N_{oct}$  : La température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (°C).

- **Facteur de Forme**

Appelé Fill Factor en anglais, le facteur de forme est le rapport de la puissance électrique maximale  $I_{cc}V_{co}$ , et détermine l'efficacité d'une cellule solaire [6].

$$FF = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

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

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

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

- **Point de puissance maximale**

C'est le point où la puissance délivrée à la charge est maximale tel que :

$$P_{ppm} = V_{ppm} \cdot I_{ppm} \quad (\text{II.6})$$

- **Rendement de conversion**

C'est le rapport de la puissance maximale qui peut être générée et de la puissance du rayonnement solaire incident sur la cellule photovoltaïque [22].

$$\eta = FF \cdot \frac{V_{co} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$P_{in}$  : La puissance du flux lumineux incident.

- **La puissance du flux lumineux incident**

$$P_{in} = S \cdot E_s \quad (\text{II.8})$$

Avec :

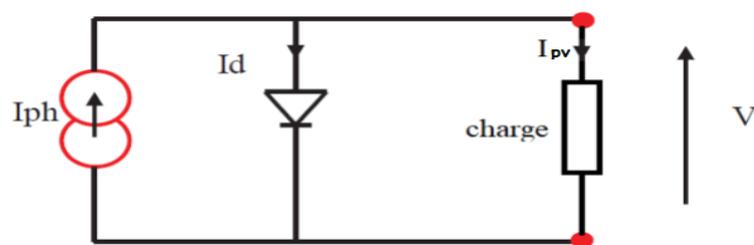
$S$  : La surface effective des cellules (m<sup>2</sup>).

## II.1.2 Modèles mathématiques

Plusieurs modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques peuvent être rencontrés et se distinguent entre eux par les différents paramètres intervenant dans les calculs de la tension et du courant du générateur.

### II.1.2.1 Cellule idéale

Prenons la figure ci-dessous comme schéma électronique équivalent d'une cellule idéale. Cette dernière est représentée avec une diode en parallèle avec une source de courant.



**Figure II-2** : Modèle d'une cellule photovoltaïque idéale[24].

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$$I_d = I_s \cdot e^{\left(\frac{q \cdot V_{pv}}{A \cdot K \cdot T_j} - 1\right)} \quad (\text{II.10})$$

Donc :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \cdot e^{\left(\frac{q \cdot V_{pv}}{A \cdot K \cdot T_j} - 1\right)} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$I_{pv}$  : Courant disponible (A).

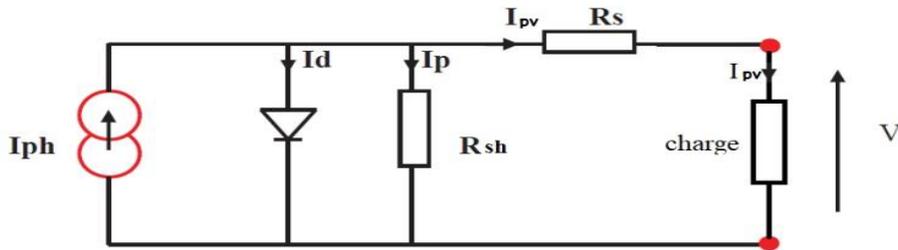
$I_{ph}$  : Courant produit par la photopile (A).

$I_d$  : Courant de la diode (A).

$V_{pv}$  : Tension aux bornes de la cellule (V).

### II.1.2.2 Modèle à une diode

Le plus utilisé des modèles grâce à ces bonnes précisions. La production de l'énergie électrique par conversion photovoltaïque est modélisée par un générateur de courant [25].



**Figure II-3** : schéma électrique équivalent du modèle à une diode.

- Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

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

- Le courant produit  $I_{ph}$  est finalement donné par la formule suivant :

$$I_{ph} = P_1 \cdot E_s \left[ (1 + P_2(E_s - E_{stc}) + P_3(T_j - T_{cref})) \right] \quad (\text{II.13})$$

Tel que :

$E_{stc}$  : Ensoleillement de référence ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

$T_{cref}$  : Température de référence ( $^{\circ}\text{C}$ ).

- Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_s \cdot e^{\left(\frac{q \cdot V_{pv}}{A \cdot K \cdot T_j} - 1\right)} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$$I_s = P_4 \cdot T_j^3 \cdot e^{\left(\frac{-E_g}{K \cdot T_j}\right)} \quad (\text{II.15})$$

Donc

$$I_d = P_4 \cdot T_j^3 \cdot e^{\left(\frac{-E_g}{K \cdot T_j}\right)} \cdot e^{\left(\frac{q \cdot V_{pv}}{A \cdot K \cdot T_j} - 1\right)} \quad (\text{II.16})$$

Et :

$$E_g = 1.1 \text{ eV} \quad (\text{II.17})$$

- Le courant de la résistance shunt est donné par :

$$I_{sh} = \left( \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.18})$$

Avec :

$R_s$  : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours ( $\Omega$ ).

$R_{sh}$  : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule ( $\Omega$ ).

Ainsi l'expression finale de la caractéristique courant-tension est donnée par l'équation ci-dessous :

$$I_{pv} = P_1 \cdot E_s \left[ (1 + P_2(E_s - E_{stc}) + P_3(T_j - T_{ref})) \right] - P_4 \cdot T_j^3 \cdot e^{\left(\frac{-E_g}{K \cdot T_j}\right)} \cdot e^{\left(\frac{q \cdot V_{pv}}{A \cdot K \cdot T_j} - 1\right)} - \left( \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$P_1, P_2, P_3, P_4$  : paramètres constants.

### II.1.3 Modélisation sous Matlab/Simulink du modèle à une diode

- Schéma bloc sous Matlab/Simulink du panneau utilisé :

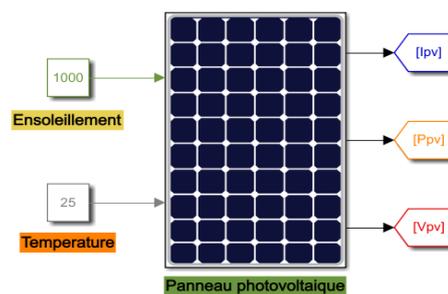


Figure II-4 Schéma bloc sous Matlab/Simulink du panneau utilisé.

#### II.1.3.1 Paramètres du panneau utilisé

Pour les expériences et les simulations effectuées durant ce travail on a utilisé un panneau photovoltaïque dont les paramètres sont :

**Tableau II-1** Caractéristique du panneau utilisé.

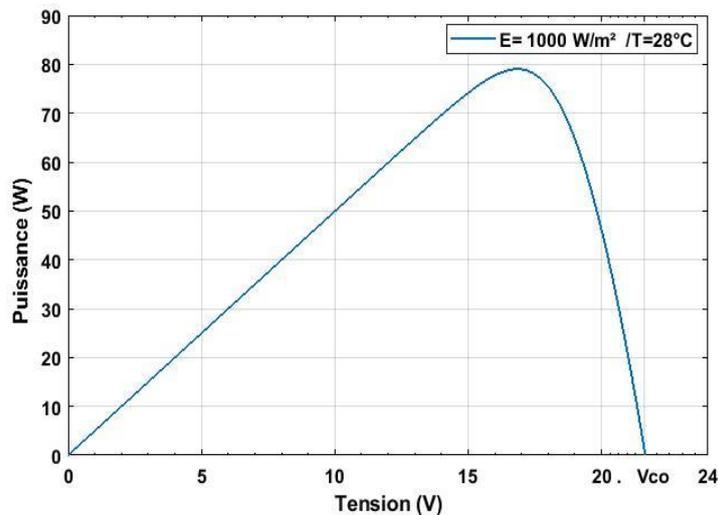
Puissance Max du panneau $P_{ppm}$	80 W
Courant au point de puissance max $I_{ppm}$	4.85 A
Tension au point de puissance max $V_{ppm}$	17.5 V
Courant de court-circuit $I_{cc}$	4.95 A
Tension en circuit ouvert $V_{co}$	21.9 V
Coefficient d'incrémentement du courant	30.00mA/°C
Coefficient d'incrémentement de la tension	-150mV/°C

**Tableau II-2** Paramètres du panneau utilisé.

P1	P2	P3	P4	Rs	Rsh
0.005	0.0000727	- 0.00001136	38.8	0.46	1500

### II.1.3.2 Caractéristique $I_{pv}$ - $V_{pv}$ et $P_{pv}$ - $V_{pv}$ du générateur photovoltaïque

En simulant le panneau utilisé sur Matlab/Simulink, avec un ensoleillement de  $1000\text{W/m}^2$  et une température de  $28^\circ\text{C}$ , la caractéristique de puissance  $P_{pv}$ - $V_{pv}$  est donnée par la figure suivante :



**Figure II-5** Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$ .

Et pour la caractéristique du courant  $I_{pv}$ - $V_{pv}$  est donnée par la figure suivante :

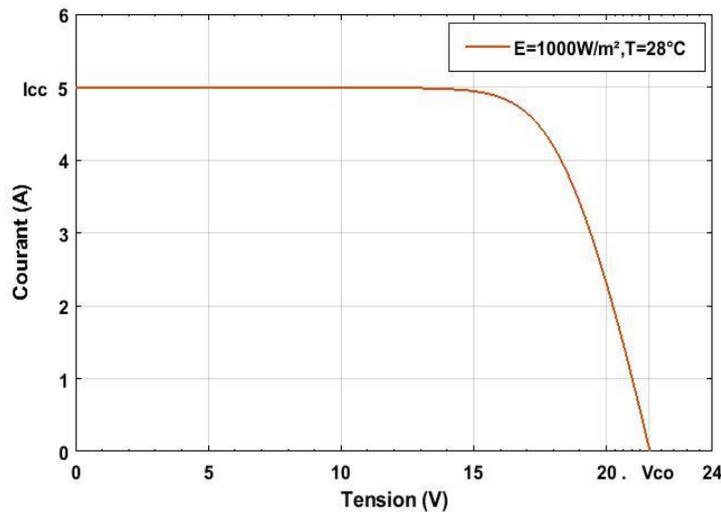


Figure II-6 Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$ .

### II.1.3.3 Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques

Afin d'étudier l'influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques  $P_{pv}$  et  $I_{pv}$  on refait la simulation sur Matlab/Simulink, mais avec différentes valeurs d'ensoleillement,  $1000W/m^2$ ,  $800W/m^2$ ,  $600W/m^2$  et  $400W/m^2$  respectivement et à une température fixe de  $28^{\circ}C$ .

Les résultats sont représentés dans les deux figures suivantes :

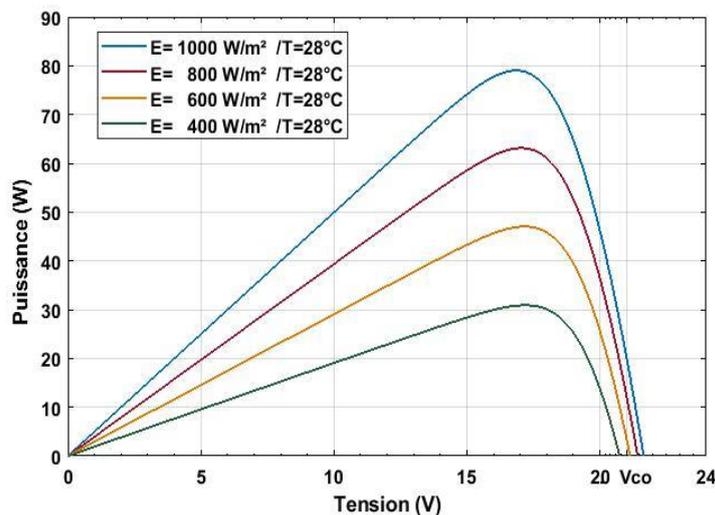
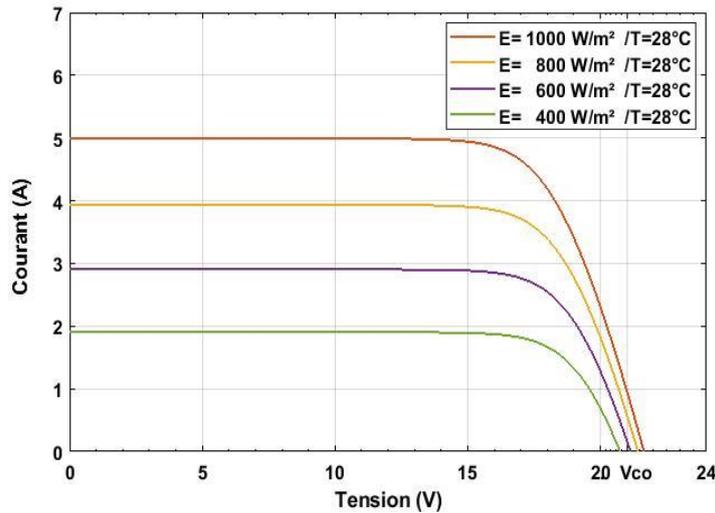


Figure II-7 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique de puissance.



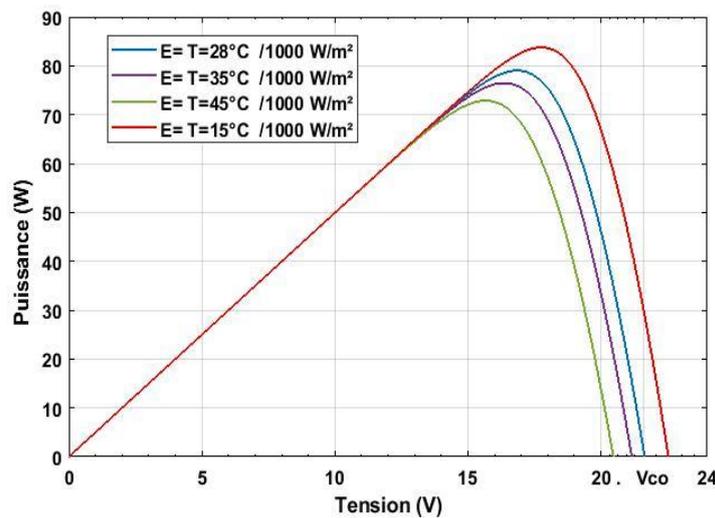
**Figure II-8** Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique de courant.

D'après ces résultats, on constate que c'est le courant de court-circuit qui est le plus influencé par l'ensoleillement contrairement à la tension de circuit ouvert, donc systématiquement c'est aussi la puissance qui est influencée par ces variations d'ensoleillement.

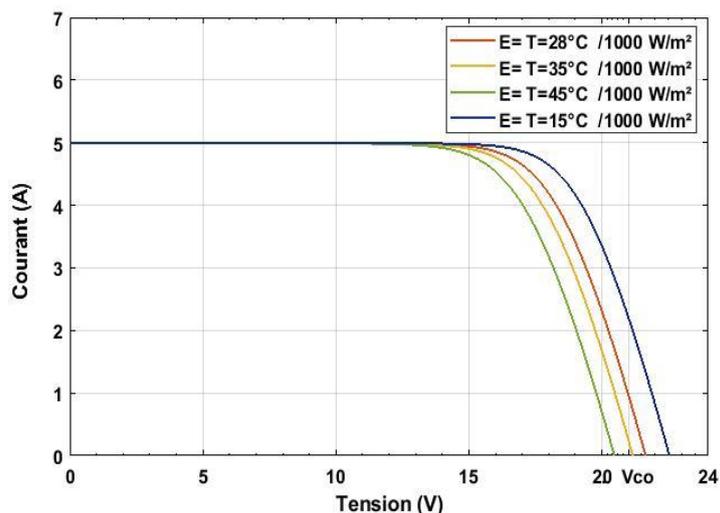
#### II.1.3.4 Influence de la température sur les caractéristiques

Pour étudier l'influence de la température sur les caractéristiques Ppv et Ipv on utilise des valeurs de température différentes 15°C, 28°C, 35°C, 45°C et en gardant la même valeur de l'ensoleillement à 1000W/m², et effectuer la simulation Matlab/Simulink.

Les résultats de cette simulation sont représentés dans les figures suivantes :



**Figure II-9** Influence de la température sur la caractéristique Ppv.



**Figure II-10** Influence de la température sur la caractéristique  $I_{pv}$ .

On remarque avec ces résultats, que la puissance atteint son maximum avec les faibles températures et diminue quand celles-ci augmentent, et la même chose est constatée pour la tension circuit ouvert où on remarque qu'elle diminue un peu avec les fortes températures et augmente avec les faibles températures, tandis que le courant court-circuit n'est en aucun cas influencé par ces variations de températures.

#### II.1.4 Méthode voltampère-métrique

Cette méthode consiste à réaliser un circuit électrique constitué d'un module PV 80 Wc, un ampèremètre en série, une charge variable et un voltmètre en parallèle.

En variant la charge, le courant généré par le panneau photovoltaïque et la tension sur ces bornes varient, et en relevant ces résultats, cela permettra de tracer les caractéristiques  $I_{pv}$  et  $P_{pv}$ , du module photovoltaïque étudié.



**Figure II-11** Mise en pratique de la méthode voltampère-métrique.

### II.1.4.1 Résultats expérimentaux

Pendant l'expérience on a mesuré une moyenne de l'ensoleillement et une température moyenne pour trois périodes de la journée, la matinée à 9h30, Midi (12h), et l'après-midi à 16h, et pour chaque essai on a relevé les tensions et les courants générés par le module photovoltaïque, avec lesquels on a pu tracer ces deux caractéristiques tout en les comparant avec celles obtenues par la simulation sur Matlab/Simulink, Ppv et Ipv représentées par les figures qui suivent :

- **Essai matinée (9h30)** : Ensoleillement = 428 W/m<sup>2</sup>. Température = 28°C.

Pour l'essai de matinée on a combiné les résultats expérimentaux et ceux de simulation, en les représentant sur ces figures suivantes :

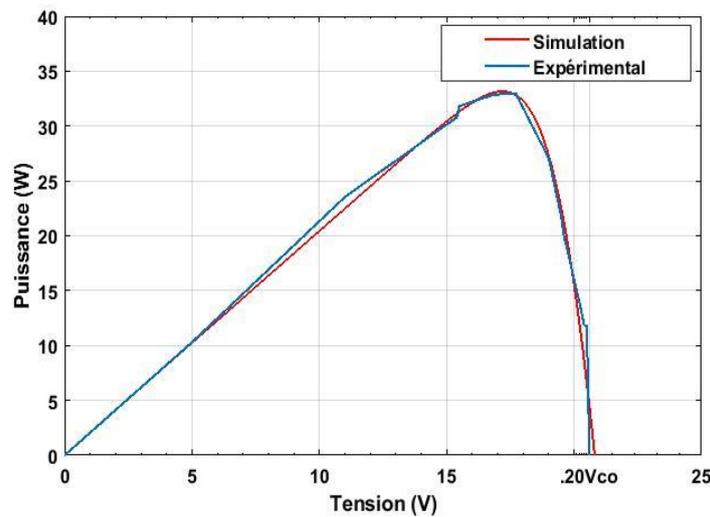


Figure II-12 Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$ .

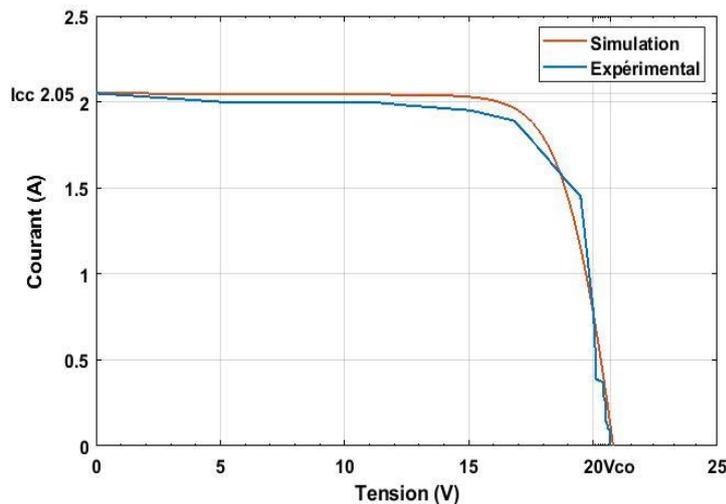
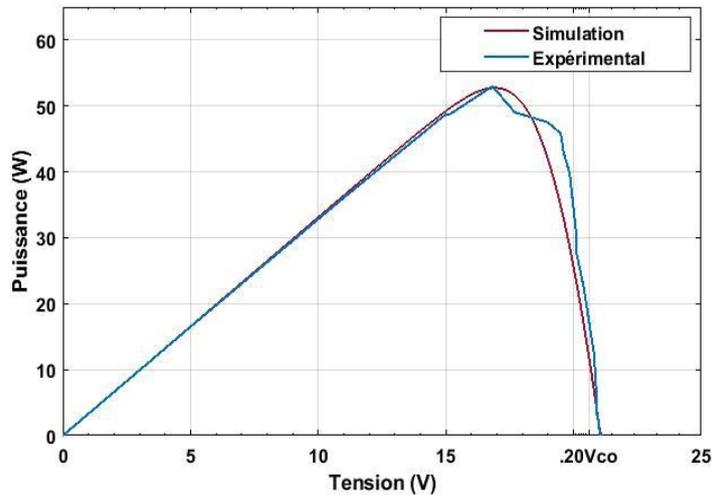


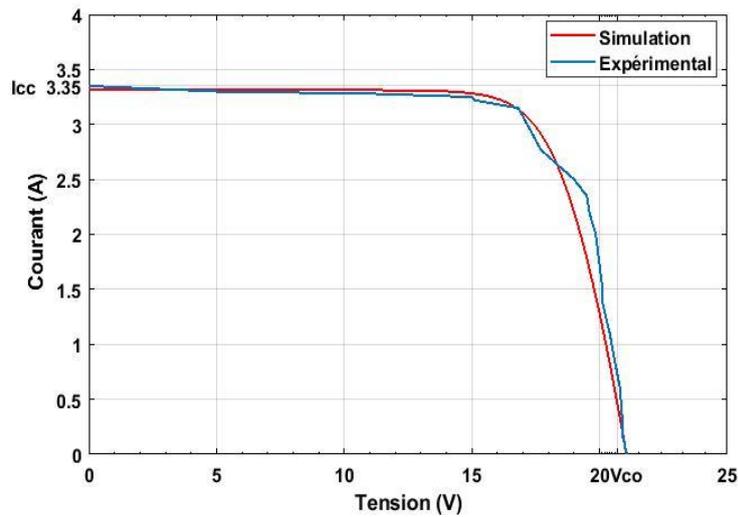
Figure II-13 Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$ .

- **Essai midi (12h)** : Ensoleillement = 680 W/m<sup>2</sup>. Température = 31°C.

Pour l'essai de midi on a combiné les résultats expérimentaux et ceux de simulation, en les représentant sur ces figures suivantes :



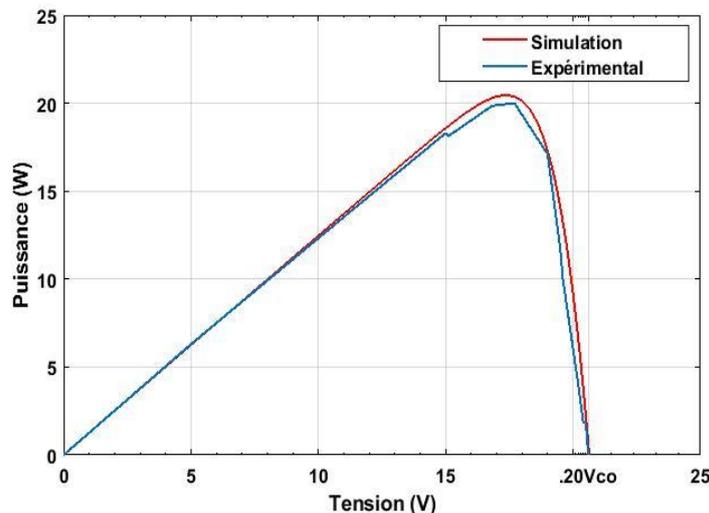
**Figure II-14** Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$ .



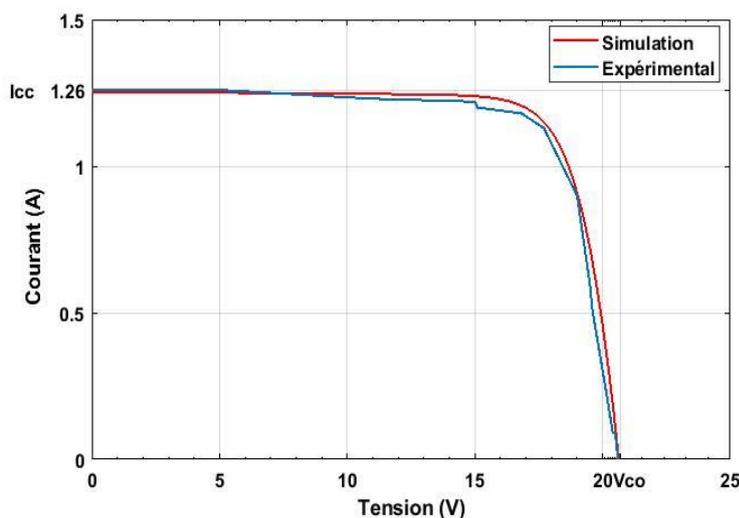
**Figure II-15** Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$ .

- **Essai après-midi (16h)** : Ensoleillement = 264 W/m<sup>2</sup>. Température = 24°C.

Et pour l'essai de l'après-midi on a combiné les résultats expérimentaux et ceux de simulation, en les représentant sur ces figures suivantes :



**Figure II-16** Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$ .



**Figure II-17** Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$ .

- **Remarque :**

À travers ces résultats représentés sur ces figures on remarque que les des courbes expérimentales ressemblent fortement à celles de la simulation sur Matlab/Simulink.

Et on confirme que l'ensoleillement a une influence directe sur la puissance générée par le générateur photovoltaïque, où on remarque qu'elle est moyenne durant la matinée et atteint son maximum vers midi, et diminue fortement l'après-midi.

### II.1.5 Effet de l'ombrage sur les caractéristiques Ppv-Vpv et Ipv-Vpv

Afin d'étudier l'effet de l'ombrage sur les performances de notre module photovoltaïque on a effectué plusieurs essais avec différents types d'ombrage et à des degrés différents.



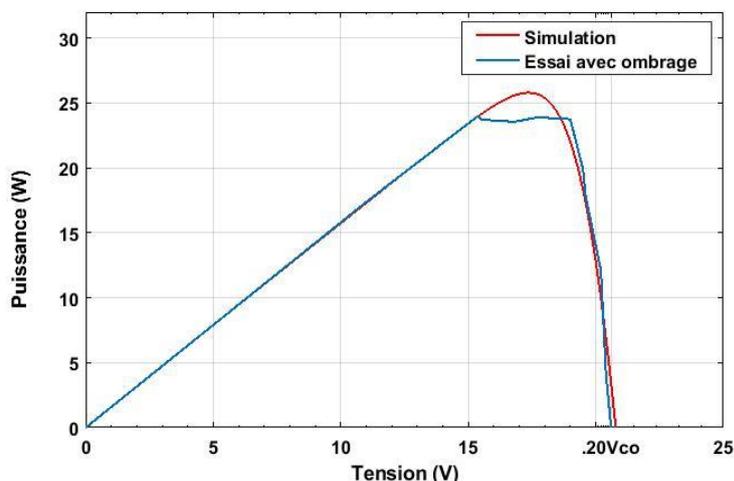
**Figure II-18** Différents types d'ombrages appliqués ( Sable à gauche / Feuilles d'arbres à droite).

Premièrement on a utilisé un ombrage avec du sable qui représente la poussière qui peut constamment se déposer sur les panneaux photovoltaïques, et ce en ombrageant le panneau utilisé partiellement puis entièrement, les figures suivantes représentent les résultats obtenus :

Pour un ensoleillement moyen mesuré de  $320 \text{ W/m}^2$  et une température moyenne de  $27^\circ\text{C}$  :

Après avoir relevé les mesures, on a représenté les résultats sur les figures suivantes démontrant l'effet de l'ombrage sur le courant et la puissance du panneau photovoltaïque.

- **Essai avec peu de sable pour un ombrage partiel :**



**Figure II-19** Caractéristique Ppv=f(Vpv) avec un ombrage partiel au sable.

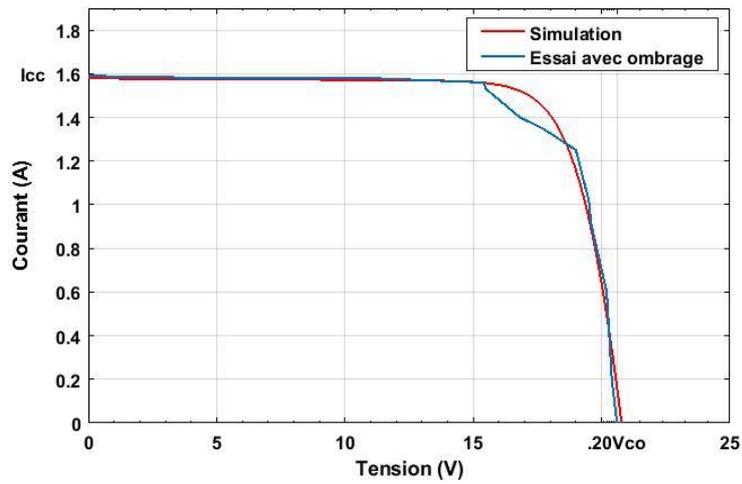


Figure II-20 Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  avec un ombrage partiel au sable.

- Essai avec beaucoup de sable pour un ombrage total :

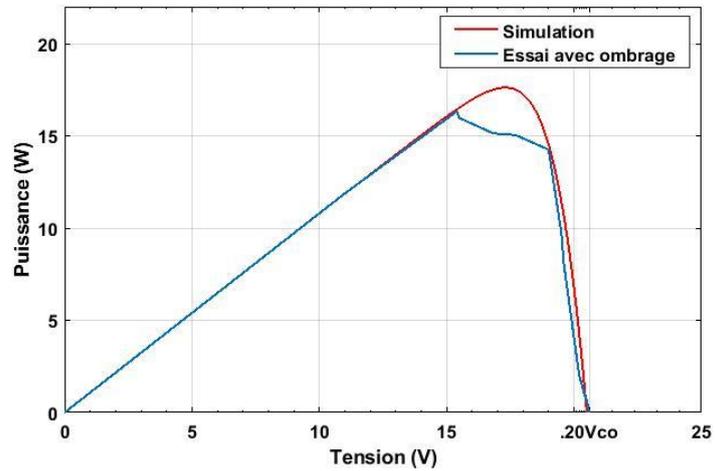


Figure II-21 Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  avec un ombrage total au sable.

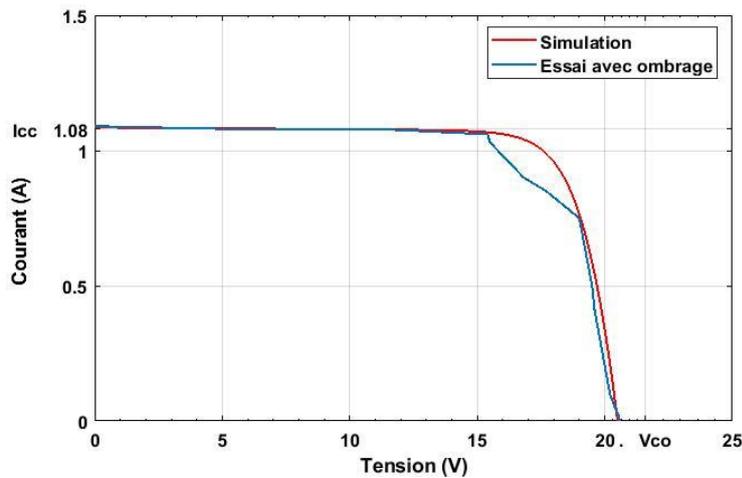


Figure II-22 Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  avec un ombrage total au sable.

- Essai avec peu de feuilles d'arbre pour un ombrage partiel :

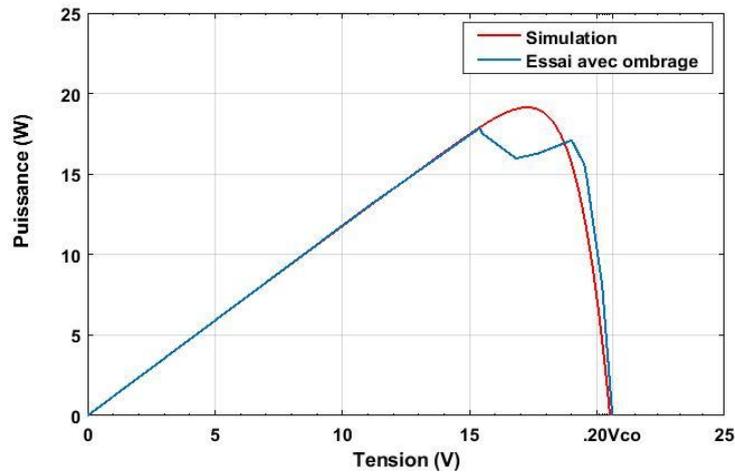


Figure II-23 Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  avec un ombrage partiel au feuilles d'arbre.

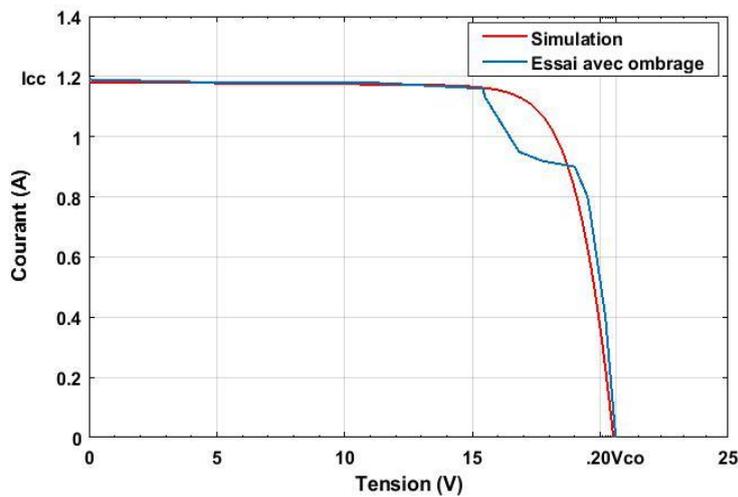


Figure II-24 Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  avec un ombrage partiel au feuilles d'arbre.

- Essai avec peu de feuilles d'arbre pour un ombrage total :

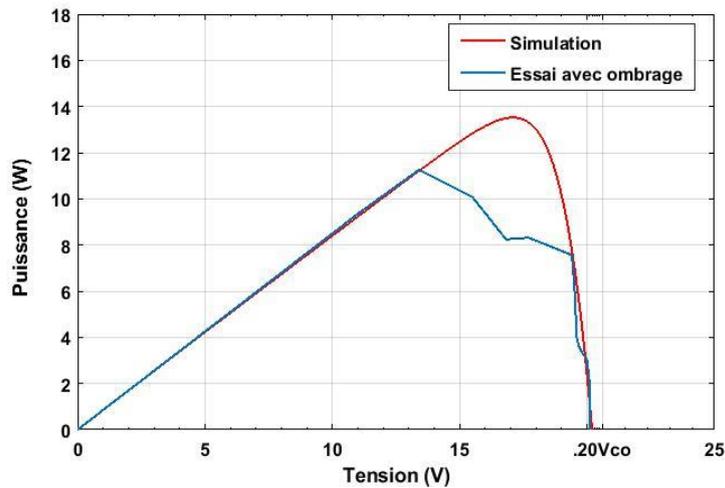
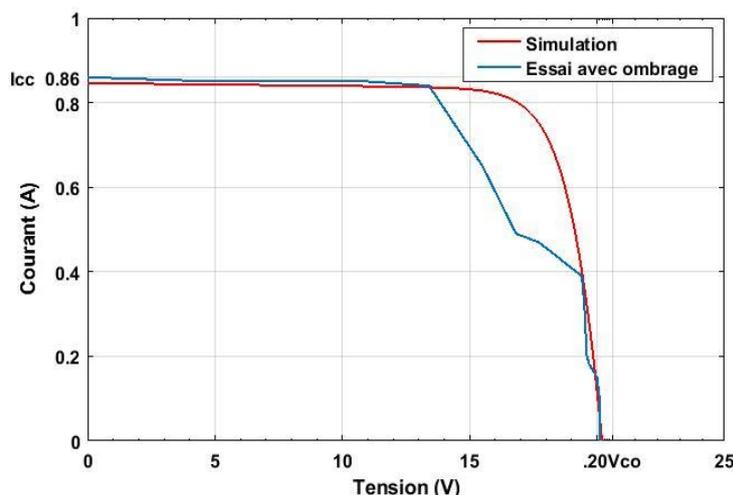


Figure II-25 Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  avec un ombrage total au feuilles d'arbre.



**Figure II-26** Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  avec un ombrage total au feuilles d'arbre.

### II.1.5.1 Remarques

La caractéristique du panneau photovoltaïque soumis aux conditions d'éclairages non homogène est déformée, elle présente plusieurs points de puissance maximale, le plus grand est le point de puissance maximal globale (PPMG) et les autres sont des points de puissance maximal locaux (PPML) [26].

D'après ces résultats on remarque que l'ombrage avec le sable a moins d'influence sur le courant et la puissance photovoltaïque contrairement au feuilles d'arbre.

L'ombrage a un impact fondamental sur la production d'énergie électrique par le panneau photovoltaïque, en conséquence ce phénomène a un également une influence sur le bon fonctionnement du système de pompage photovoltaïque. Cela cause la diminution de la puissance fournie à la pompe ce qui peut engendrer une diminution directe du débit, donc les performances du système seront dégradées [26].

Il est donc nécessaire d'appliquer un nettoyage périodique des panneaux photovoltaïques, de choisir un emplacement approprié pour notre installation du système photovoltaïque tout en minimisant la présence de l'ombres. Et si cela ne peut être évité, l'introduction d'un contrôle MPPT permettra d'atténuer l'impact de l'ombrage sur les performances de notre système [27].

### II.1.6 Point de puissance maximale

Par définition, une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), associé à un étage intermédiaire DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quel que soit les conditions météorologiques (irradiation, température), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum [22] [31].

#### II.1.6.1 Mode de fonctionnement

Le but de l'MPPT est de trouver le point de sortie maximum du courant fourni par le panneau. Puis de faire en sorte de toujours utiliser cette pleine puissance. En résumé, le régulateur de charge MPPT tire du panneau la puissance maximale [18].

### II.1.6.2 Avantage d'un régulateur de charge MPPT

- Protection des batteries contre la surcharge et de la décharge profonde.
- Lutte contre le surdimensionnement du câblage entre le panneau et l'équipement. Cela fait baisser les coûts.
- Augmentation de la production d'énergie fournie par le système (20 à 30 %).
- Allongement de la durée de vie des batteries.

### II.1.6.3 Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

Le rayonnement solaire est le principal élément qui influence la variation de la puissance générée par les panneaux photovoltaïques, ce dernier, a une valeur maximale pour chaque niveau d'ensoleillement. Afin de sécuriser le fonctionnement d'un système autour de la valeur de puissance maximale, la méthode P&O est utilisée en raison de sa rapidité de réaction et de sa structure simple [28].

Une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée (augmentée ou diminuée) avec une constante (C) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation.

Précisément, si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction. Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé [22].

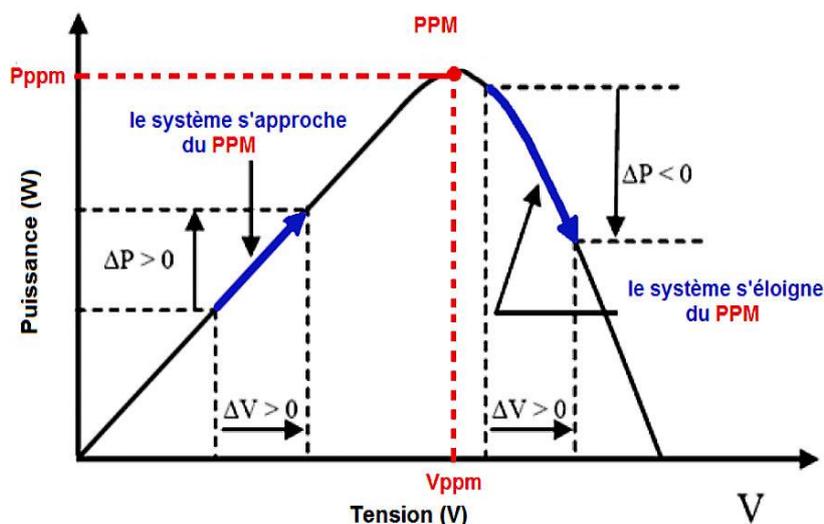


Figure II-27 Caractéristique Ppv d'un panneau photovoltaïque.

II.1.6.3.1 Algorithme de la méthode P&O

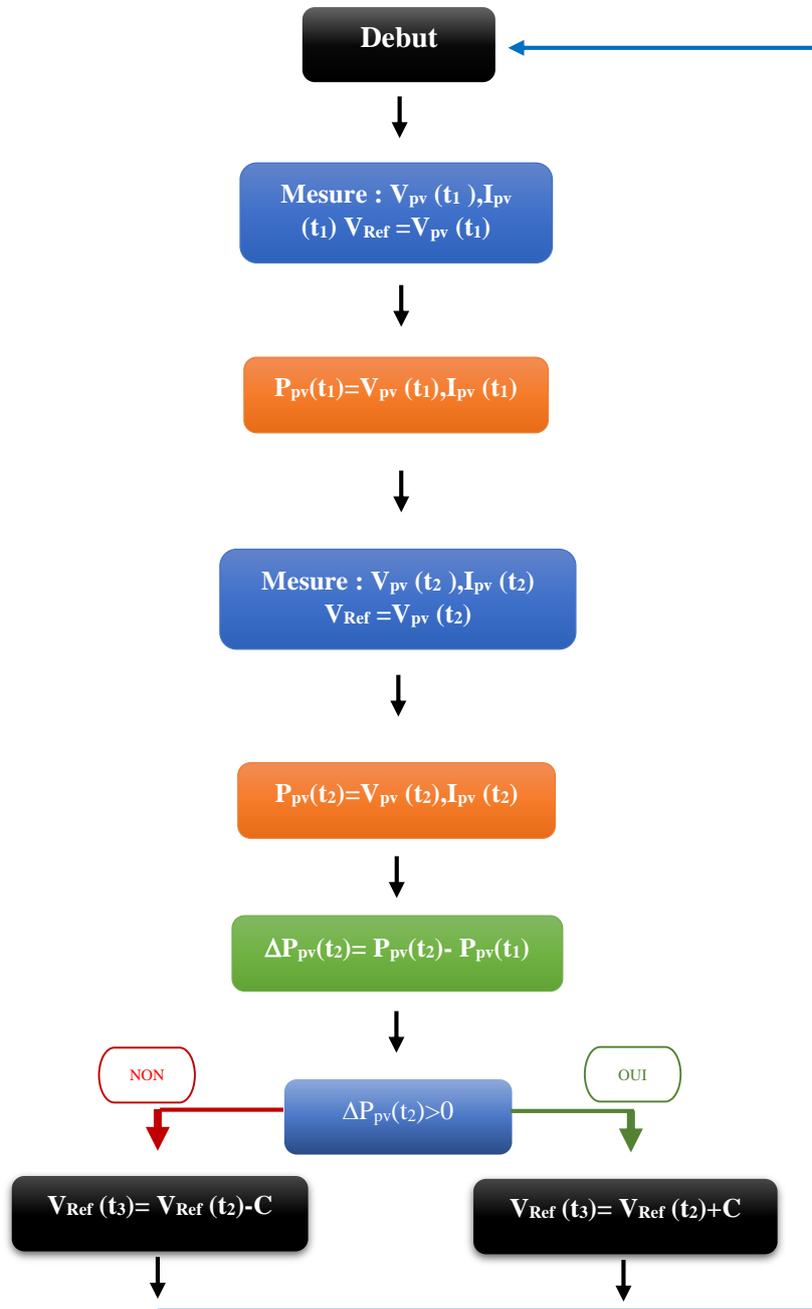


Figure II-28 Organigramme de la méthode P&O.

### II.1.6.4 Autres méthodes

D'autres algorithmes MPPT peuvent être utilisés mais plus complexes que la méthode P&O, qui font appel à de nouvelles techniques, on peut citer quelques-uns :

- Algorithmes basés sur la logique floue.
- Algorithmes à base de réseau de neurones.
- Algorithmes d'identification à temps réel du MPP.
- Méthode de l'oscillation forcée.

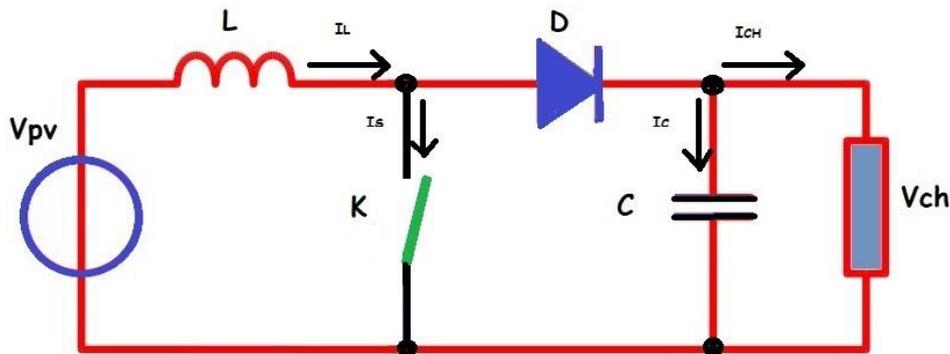
### II.1.7 Modélisation des convertisseurs

On fait recours aux convertisseurs afin de maximiser la production de puissance des sources, en connectant chacune à un convertisseur dans le but de contrôler son point de fonctionnement, en respectant l'adaptation nécessaire avec son bus commun.

#### II.1.7.1 Modélisation d'un hacheur survolteur – BOOST

Dans le but d'augmenter la tension d'une source photovoltaïque ou d'une quelconque source continue, on fait appel à un hacheur survolteur, autrement dit hacheur BOOST.

Ce convertisseur DC/DC nous permet d'adapter la tension aux bornes de notre panneau photovoltaïque à l'aide d'une commande permettant d'obtenir un fonctionnement au point de puissance maximale [29].



**Figure II-29** Circuit électrique d'un hacheur BOOST.

D'après la Figure II-28 :

Lorsque l'interrupteur K est fermé :

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} \quad (II.20)$$

$$0 = C \frac{dV_{ch}}{dt} + I_{ch} \quad (II.21)$$

Lorsque l'interrupteur K est ouvert :

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + (1 - \alpha)V_{ch} \quad (II.22)$$

$$(1 - \alpha)I_L = C \frac{dV_{ch}}{dt} + I_{ch} \quad (II.23)$$

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique moyen. Son expression est donnée par l'équation (II.24)[22] .

$$V_{ch} = \frac{1}{(1-\alpha)} V_{pv} \quad (\text{II.25})$$

Et le courant par la relation :

$$I_{ch} = (1 - \alpha) I_L \quad (\text{II.26})$$

Avec

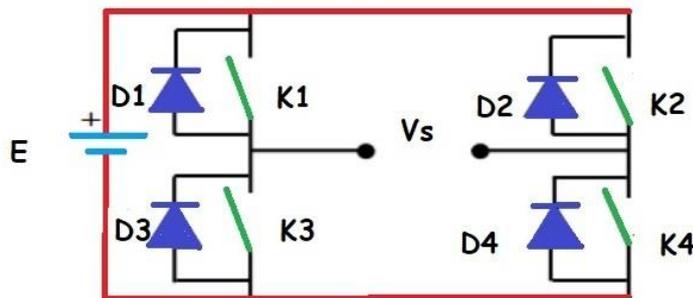
$\alpha$  : Le rapport cyclique.

En contrôlant le rapport cyclique on peut réguler la tension de sortie.

### II.1.7.2 Modélisation de l'onduleur de tension monophasé

Le moteur asynchrone doit être alimenté en alternatif, et pour cela on utilise un convertisseur alternatif (DC/AC) qui est l'onduleur monophasé. Ainsi la tension continue délivrée par le panneau photovoltaïque sera converti en tension alternative [6].

Le convertisseur alternatif (DC/AC) est représenté sur la figure ci-dessous :



**Figure II-30** Schéma électrique d'un onduleur monophasé en pont H.

$$V_s = E(K_1 - K_3) \quad (\text{II.27})$$

Avec

$$K_1 = K_4 \text{ et } K_2 = K_3$$

Tel que :

$E$  : Tension Continue (V).

$V_s$  : Tension de sortie onduleur alternatif monophasé (V).

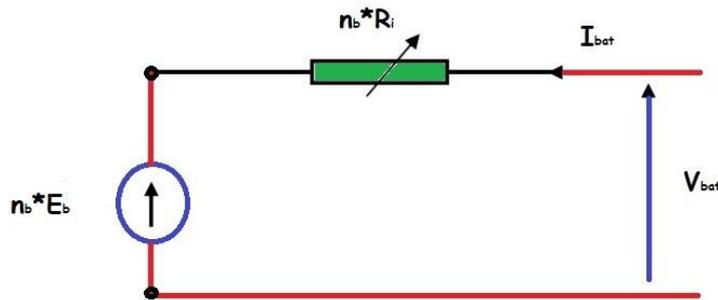
$K_1, K_2, K_3, K_4$  : Transistor de puissance.

$D1, D2, D3, D4$  : Diode de roue libre.

Les signaux de commande des interrupteurs  $K_1, K_2, K_3$  et  $K_4$  sont complémentaires.

### II.1.8 Modélisation et simulation de la batterie

Vu le grand nombre de type de batterie, et des paramètres qui interviennent (l'état de charge, la capacité de stockage de la batterie, le taux de charge/décharge, la température et la durée de vie.) des représentations très empirique du comportement de la batterie peuvent être établies. Le système de stockage utilisé dans notre installation est une batterie d'accumulateur au plomb [6].



**Figure II-31** Schéma équivalent du modèle électrique.

Pour un nombre de cellule  $n_b$ , l'équation de la tension est donnée par la formule suivante :

$$V_{bat} = n_b \cdot E_b \pm R_i \cdot I_{bat} \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$V_{bat}$  : Tension de la batterie (V).

$I_{bat}$ : Courant de la batterie (A).

$E_b$  : La force électromotrice en fonction de l'état de charge de la batterie (V).

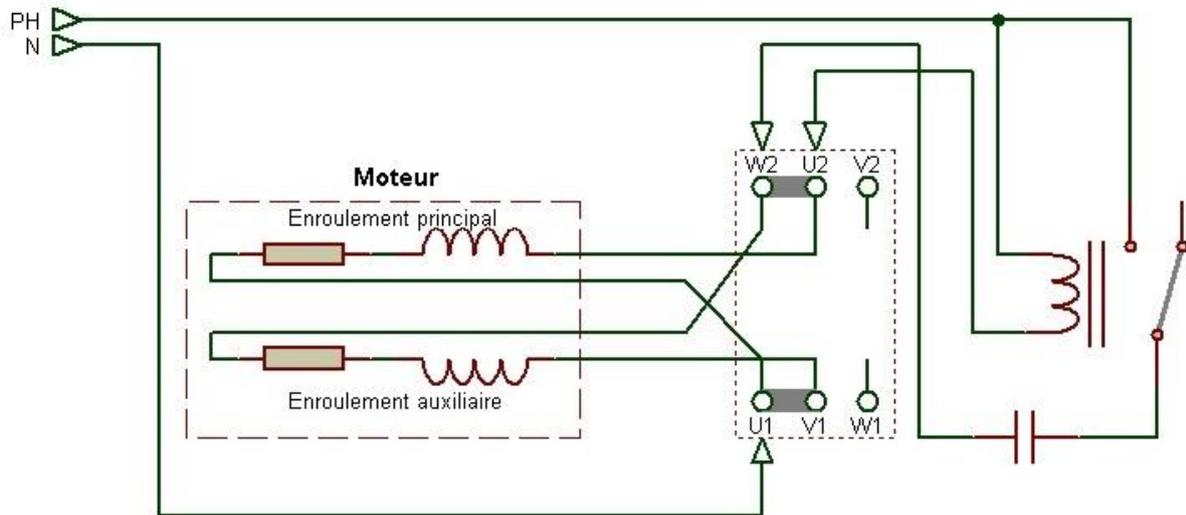
$R_i$  : La résistance interne, variable en fonction de l'état de charge ( $\Omega$ ).

## II.2 Modélisation de la machine asynchrone à condensateur de démarrage :

Les machines à induction à condensateur de démarrage comportent deux phases. Le schéma synoptique à savoir, une phase de marche dit principal et une phase de démarrage dit auxiliaire. L'enroulement principal occupe les deux tiers des encoches du stator. La section des fils de l'enroulement de marche est plus importante que celui de l'enroulement auxiliaire qui est conçu juste pour la phase de démarrage. Puisque la résistance est inversement proportionnelle à la section, la résistance ohmique de l'enroulement principal demeure très faible. L'enroulement auxiliaire occupe le reste des encoches. Il est caractérisé par une faible section de fil et de valeur ohmique plus importante que celle de la phase de marche. Le repérage des enroulements, principal et auxiliaire, sont similaires à celui du moteur asynchrone monophasé à condensateur permanent. Le démarrage de ce type de moteurs est assuré par une alimentation simultanée des enroulements principal et auxiliaire, une fois la machine asynchrone monophasée fonctionne, elle commencera à tourner au voisinage de sa vitesse nominale, un contact centrifuge placé électriquement en série avec le condensateur et mécaniquement entre la partie tournante appelée arbre du moteur et la partie fixe dite stator.

Dès que la vitesse atteint sa valeur nominale le contacte s'ouvre en assurant une

interruption du courant auxiliaire, par conséquent le moteur rentre dans sa phase de fonctionnement normal sans condensateur [14].



**Figure II-32** Représentation schématique du moteur asynchrone monophasé à condensateur de démarrage[39].

### II.2.1 Constitution :

La machine asynchrone monophasée se compose de deux parties principales, le stator qui est la partie fixe, et le rotor la partie tournante [6].

- **Le stator**

C'est un cylindre creux, dont sa surface interne est formée par des pôles, sur lesquels se trouve un bobinage principal et un autre auxiliaire, le stator est alimenté directement du réseau avec une tension de fréquence  $f_s$  (de pulsation  $s$ ), produisant un champ tournant à la vitesse de rotation [23].

$$N_s = \frac{f_s}{p} \quad (\text{II.29})$$

Avec :

$p$  : Le nombre de paires de pôles.

- **Le rotor**

C'est la partie mobile de la machine formée d'un cylindre feuilleté se trouvant à l'intérieur du stator et tourne sous l'effet du champ tournant crée par le stator, sur un axe fixe avec une vitesse de rotation  $N_r < N_s$ , qui correspond à une vitesse angulaire ( $\Omega_r < \Omega_s$ ).

Le Rapport :

$$\frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (\text{II.30})$$

Est appelé le glissement du rotor par rapport au champ tournant du stator, on peut varier la vitesse  $N_r$  du moteur asynchrone qui est égale à :

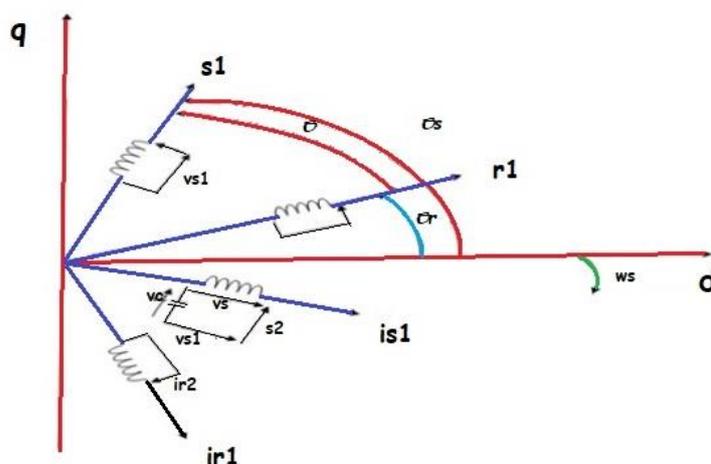
$$N_r = \frac{f_s}{p} \cdot (1 - g) \quad (\text{II.31})$$

Par :

- Modification du nombre de paires de pôles.
- Variation du glissement ( $g$ ).
- Variation de la fréquence  $f$  d'alimentation.

## II.2.2 Equations électriques de la machine :

Le référentiel choisi pour l'étude des processus électromagnétiques de la machine est le système  $(d, q)$  lié au stator. On considère que la f.m.m développée par chaque phase statorique a une distribution sinusoïdale suivant la circonférence du rotor [14].



**Figure II-33** Schéma référentiel de la machine dans le système  $(d,q)$  lié au stator.

En générale, l'expression ci-dessous exprime la relation entre la tension aux bornes d'une bobine parcourue par un courant  $i$ , de résistance  $R$  et d'une variation de flux.

$$v = R i + \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II.32})$$

D'après la figure (II-33), les équations électriques de fonctionnement de la machine asynchrone monophasée à condensateur permanent peuvent s'écrire : (loi d'Ohm généralisée). Notons que les grandeurs sont exprimées en valeurs réelles par [34] :

$$\left( \begin{array}{l} v_{s1} = R_{s1} i_{s1} + \frac{d\phi_{s1}}{dt} \\ v_{s2} = R_{s2} i_{s2} + \frac{d\phi_{s2}}{dt} + v_c \\ v_{r1} = 0 = R_r i_{r1} + \frac{d\phi_{r1}}{dt} \\ v_{r2} = 0 = R_r i_{r2} + \frac{d\phi_{r2}}{dt} \\ i_{s2} = i_c = C \frac{dv_c}{dt} = \frac{dq_e}{dt} \end{array} \right) \quad (\text{II.33})$$

Avec

$q_e$  : quantité d'électricité (C).

$\phi_{s1}, \phi_{s2}, \phi_{r1}, \phi_{r2}$  : Les flux totaux statoriques et rotoriques à travers les bobines des enroulements.

Les indices "s" et "r" indiquent les grandeurs du stator et du rotor respectivement.

L'équation (II.33) peut se mettre sous la forme matricielle [34] :

Avec :

$$\begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{r1} \\ v_{r1} \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{r1} \\ i_{r1} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{s1} \\ \phi_{s2} \\ \phi_{r1} \\ \phi_{r1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ v_c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

Tel que :

$$v = [v_{s1} \ v_{s2} \ 0 \ 0]^t \quad (\text{II.35})$$

$$i = [i_{s1} \ i_{s2} \ i_{r1} \ i_{r1}]^t \quad (\text{II.36})$$

$$\phi = [\phi_{s1} \ \phi_{s2} \ \phi_{r1} \ \phi_{r1}]^t \quad (\text{II.37})$$

[R] : la matrice des résistances :

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Avec :

$$[\phi] = [L] \cdot [i] \quad (\text{II.39})$$

Et :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{s1} & 0 & M_{s1,r1} & M_{s1,r2} \\ 0 & L_{s2} & M_{s2,r1} & M_{s2,r2} \\ M_{r1,s1} & M_{r1,s2} & L_{r1} & 0 \\ M_{r2,s1} & M_{r2,s2} & 0 & L_{r2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

La diagonale de la matrice [L] est constante car l'entrefer est constant.

Les mutuelles entre les enroulements dépendent des positions relatives de  $\theta_s$  et  $\theta_r$ .

$$\begin{cases} M_{s1r1} = M_d \cdot \cos(\theta_r - \theta_s) \\ M_{s1r2} = M_d \cdot \sin(\theta_r - \theta_s) \\ M_{s2r1} = -M_q \cdot \sin(\theta_r - \theta_s) \\ M_{s2r2} = M_q \cdot \cos(\theta_r - \theta_s) \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

Avec :

$$\theta = \theta_s - \theta_r \quad (\text{II.42})$$

$\theta$  : Angle de glissement.

$M_d$  et  $M_q$  sont les mutuelles inductances maximales, donc les quatre composantes du vecteur flux sont présentées par :

$$\begin{bmatrix} \phi_{s1} \\ \phi_{s2} \\ \phi_{r1} \\ \phi_{r2} \\ \phi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{s1} & 0 & M_d \cdot \cos(\theta) & M_d \cdot \sin(\theta) & 0 \\ 0 & L_{s2} & -M_q \cdot \sin(\theta) & M_q \cdot \cos(\theta) & 0 \\ M_d \cdot \cos(\theta) & -M_q \cdot \sin(\theta) & L_{r1} & 0 & 0 \\ M_d \cdot \sin(\theta) & M_q \cdot \cos(\theta) & 0 & L_{r2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{r1} \\ i_{r2} \\ v_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

### II.2.2.1 Expression des grandeurs du rotor dans le référentiel lié du stator :

On exprimera les grandeurs réelles du rotor ( $i_{r1}$ ,  $i_{r2}$ ), ( $\phi_{r1}$ ,  $\phi_{r2}$ ) dans le référentiel du stator ( $i_{rd}$ ,  $i_{rq}$ ), ( $\phi_{rd}$ ,  $\phi_{rq}$ ) par [34] :

$$\begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = [A_s] \cdot \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \end{bmatrix} \text{ Et } \begin{bmatrix} \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \end{bmatrix} = [A_s] \cdot \begin{bmatrix} \phi_{r1} \\ \phi_{r2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.44})$$

Avec

$$[A_s] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.45})$$

$[A_s]$  : Matrice de rotation des axes.

Donc l'équation (II.33) devient :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_{sd} \cdot i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ v_{sq} = R_{sq} i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + v_c \\ v_{r1} = 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{rq} \\ v_{r2} = 0 = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \phi_{rd} \\ i_{sq} = i_c = C \frac{dv_c}{dt} = \frac{dq}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

A partir des équations (II.43), les expressions des flux en fonctions des courants statoriques et rotoriques sont :

$$\phi_{sd} = L_{sd} \cdot i_{sd} + M_d \cdot i_{rd} \quad (\text{II.47})$$

$$\phi_{sq} = L_{sq} \cdot i_{sq} + M_q \cdot i_{rq} \quad (\text{II.48})$$

$$\phi_{rd} = L_{rd} \cdot i_{rd} + M_d \cdot i_{sd} \quad (\text{II.49})$$

$$\phi_{rq} = L_{rq} \cdot i_{rq} + M_q \cdot i_{sq} \quad (\text{II.50})$$

En prenant  $L_{rd}=L_{rq}=L_r$  (deux phases symétriques au rotor) ce qui est d'ailleurs toujours le cas dans un moteur à cage d'écuréuil. Comme les courants rotoriques sont inaccessibles pour la mesure, il faut les exprimer en fonction des flux rotoriques et courants statoriques [34].

Les équations (II.46) deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{sd} = R_{sd} \cdot i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} + (L_{sd} - \frac{M_d^2}{L_r}) \cdot \frac{d i_{sd}}{dt} \\ v_{sq} - v_c = R_{sq} i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + (L_{sq} - \frac{M_q^2}{L_r}) \cdot \frac{d i_{sq}}{dt} \\ v_{r1} = 0 = \frac{R_r}{L_r} \phi_{rd} - \frac{R_r}{L_r} \cdot M_d \cdot i_{sd} + \frac{d\phi_d}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{rq} \\ v_{r2} = 0 = \frac{R_r}{L_r} \phi_{rq} - \frac{R_r}{L_r} \cdot M_q \cdot i_{sq} + \frac{d\phi_q}{dt} + \omega_r \cdot \phi_{rd} \\ i_{sq} = i_c = C \frac{dv_c}{dt} = \frac{dq}{dt} \end{array} \right. \quad (\text{II.51})$$

### II.2.2.2 Détermination du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique développé par la machine est donné par l'expression suivante [34] :

$$Te = p \cdot M(\bar{i}_s \cdot \bar{\phi}_r) \quad (\text{II.52})$$

Avec :

$p$  : nombre de pair de pole.

$$\bar{i}_s = i_{sd} + j i_{sq} \quad (\text{II.53})$$

$$\bar{\phi}_r = \phi_{rd} + j \phi_{rq} \quad (\text{II.54})$$

De l'expression (II.43), et avec l'utilisation des équations (II.47) -(II.48) -(II.53) on déduit l'expression finale du couple électromagnétique par :

$$Te = \frac{p}{L_r} (M_d \cdot \phi_{rq} \cdot i_{sq} - M_q \cdot \phi_{rd} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II.55})$$

### II.2.2.3 Equation mécanique de la machine :

L'équation mécanique du moteur est donnée par [34] :

$$J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} = Te - T_r - f_v \cdot \Omega_r \quad (\text{II.56})$$

$J$  : est le moment d'inertie du rotor et de toute charge couplée avec lui (Kg.m<sup>2</sup>).

$T_r$  : est le couple de charge (N.m).

$f_v$  : est coefficient de frottement (N).

$\Omega_r$  : Vitesse rotorique du moteur (rad/s).

## II.3 Modélisation de la pompe centrifuge

### II.3.1 Le Débit

Le débit d'eau de la pompe est la quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un laps de temps. Le débit est donné en litre / heure (l/h) ou en mètre cube / second (m<sup>3</sup>/s) [30].

La figure suivante représente le débit de notre pompe après simulation sur Matlab/Simulink :

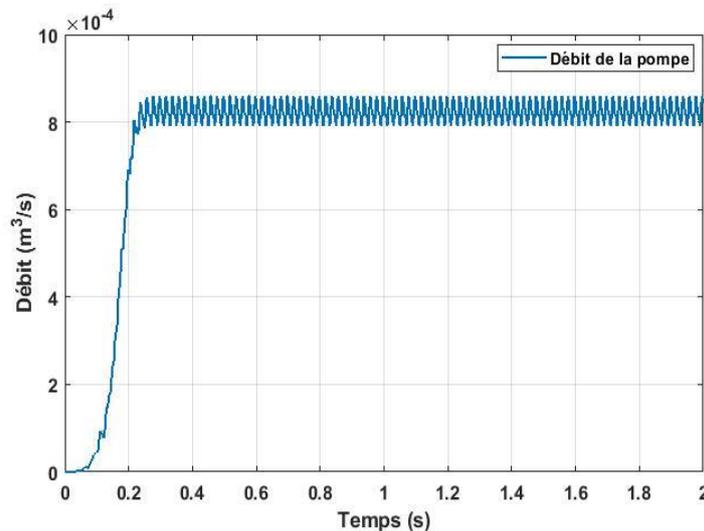


Figure II-34 Débit de la pompe.

### II.3.2 La hauteur manométrique totale

La hauteur manométrique totale est la différence de pression en mètre de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement, elle peut être calculée comme suite [30] :

$$HMT = Hg + P_{pert} \quad (II.57)$$

Avec :

$Hg$  : Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation (m).

$P_{pert}$  : Pertes de charge produites par le frottement d'eau sur les parois des conduites (L), de leur diamètre (dc) et de débit de la pompe (Q) et s'expriment en mètre de colonne d'eau

Le diamètre des conduites doit être calculé afin que les pertes de charge correspondent au plus à 10% de la hauteur géométrique totale.

### II.3.3 Niveau statique

Le niveau statique d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau avant pompage [30].

### II.3.4 Niveau dynamique

La distance entre le sol et la surface de l'eau d'un puits, pour un pompage d'un certain débit est appelée le niveau dynamique. Le niveau dynamique est calculé pour un débit moyen

dans le calcul du HMT. La différence entre les niveaux dynamiques et statiques est appelée rabattement [30].

### II.3.5 La puissance hydraulique

Pour pouvoir dimensionner la pompe, on a besoin de calculer la puissance hydraulique nécessaire pour le pompage, et on doit tenir compte de deux facteurs qui sont [32] :

- La quantité d'eau requise.
- La hauteur que doit convaincre la pompe.

La puissance hydraulique est ainsi donnée par la formule suivante :

$$P_{hyd} = g \cdot HMT \cdot Qv \cdot \varphi \quad (II.58)$$

Avec :

$P_{hyd}$  : puissance communiquée au fluide par la pompe (W).

$g$  : accélération de la pesanteur (9.81 m/s<sup>2</sup>).

$HMT$  : hauteur manométrique totale atteinte par la pompe (m).

$Qv$  : débit volumique (m<sup>3</sup>/s).

$\varphi$  : masse volumique d'eau (1000Kg/m<sup>3</sup>).

## II.4 Dimensionnement du système

### II.4.1.1 Puissance hydraulique :

La puissance hydraulique qu'il nous faut pour effectuer un pompage est obtenue par la formule suivante :

$$P_{hyd} = \varphi \cdot g \cdot Qv \cdot HMT \quad (II.59)$$

### II.4.1.2 Puissance mécanique :

Pour avoir la puissance mécanique nécessaire on fait recours à l'équation suivante :

$$P_{mec} = \frac{C_H \cdot Q \cdot HMT}{\eta_p} \quad (II.60)$$

Avec :

$C_H$  : Constante hydraulique.

$\eta_p$  : Rendement de pompe (%).

### II.4.1.3 Constante hydraulique :

$$C_H = \frac{\varphi \cdot g}{3600} \quad (II.61)$$

#### II.4.1.4 Dimensionnement du moteur asynchrone :

Le dimensionnement du moteur, réside dans le calcul de la puissance électrique qu'il lui faut pour entrainer la pompe, cette puissance est exprimée en (W) et se calcule par la puissance mécanique requise par la pompe et le rendement du moteur :

$$P_{elec} = \frac{P_{mec}}{\eta_m} \quad (II.62)$$

Avec :

$\eta_m$  : Rendement du moteur (%).

$P_{mec}$  : Puissance mécanique requise par la pompe (W).

#### II.4.1.5 Puissance demandée par les modules :

En tenant compte des pertes de puissance au niveau de l'onduleur, la puissance reçue par le moteur sera égale à la puissance délivrée par l'ensemble des modules PV soustraite des pertes au niveau de l'onduleur. Nous aurons par la suite :

$$P_{dem} = \frac{P_{elec}}{\eta_{ond}} \quad (II.63)$$

Avec :

$\eta_{ond}$  : Rendement de l'onduleur

#### II.4.1.6 Temps de pompage nécessaire :

Le temps de pompage nécessaire pour satisfaire le besoin en eau et qui se calcule comme suit :

$$T_p = \frac{V}{Qv} \quad (II.64)$$

Avec :

$V$  : Quantité d'eau requise (m<sup>3</sup>).

$Qv$  : Débit nominal (m<sup>3</sup>/ h).

#### II.4.1.7 Energie électrique journalière demandée :

Les besoins journaliers énergétiques en électricité peuvent être évalués comme suit :

$$E_{elec} = P_{dem} \cdot T_p \quad (II.65)$$

#### II.4.1.8 Dimensionnement des panneaux :

La puissance du générateur photovoltaïque ( $P_{pv}$ ) à installer doit tenir compte de l'énergie journalière demandée par la charge, de la durée de pompage nécessaire pour satisfaire les besoins journaliers en eau égale au temps de pompage et des pertes environ de la puissance attribuable à la température et à la poussière, la dimension théorique de celui-ci sera de :

$$P_{PV} = \frac{E_{elec}}{t_p(1-pertes)} \quad (II.66)$$

#### II.4.1.9 Nombre de panneaux :

Le nombre de panneaux nécessaires se calcule par :

$$N_{PV} \geq \frac{P_{PV}}{P_{WC}} \quad (\text{II.67})$$

#### II.4.1.10 Nombre de panneaux en série :

$$N_{PVs} = \frac{V_{nom-ond}}{V_{mpp}} \quad (\text{II.68})$$

#### II.4.1.11 Nombre de panneaux en parallèle :

$$N_{PVp} = \frac{N_{PV}}{N_{PVs}} \quad (\text{II.69})$$

#### II.4.1.12 Dimensionnement des batteries

#### II.4.1.13 Capacité des batteries

La capacité des batteries de stockage est déterminée à partir de la charge demandée maximale, elle est exprimée par :

$$C_{batt} = \frac{Bj+Aut}{V_{batt} \cdot P_{DD} \cdot K_T} \quad (\text{II.70})$$

$$C_{batt} = \frac{740 \times 1}{12 \times 0.6 \times 0.95} = 120.91 \text{Ah}$$

$K_T = 0.85$  : coefficient de température de la capacité (température de fonctionnement des batteries est de  $-10^\circ$ ).

$Aut$  : autonomie (en jours).

$P_{DD}$  : la profondeur de décharge profonde (%).

$V_{batt}$  : tension des batteries (V).

#### II.4.1.14 Nombre des batteries

Calcul du nombre de batteries :

$$N_{batt} = \frac{C_{batt}}{C_{batt-unitaire}} \quad (\text{II.71})$$

$$N_{batt} = \frac{120.91}{100} = 1.2091 \approx 2$$

On obtient 2 batteries à installer

Avec :  $C_{batt-unitaire} = 100 \text{Ah}$ . : Capacité d'une batterie unitaire.

#### II.4.1.15 Nombre de batteries en série - parallèle

Calcul du nombre de batteries en série :

$$N_{batt-série} = \frac{V_{nom-ond}}{U_{batt}} \quad (II.72)$$

$$N_{batt-série} = \frac{12}{12} = 1$$

$$N_{batt-paral} = Ent\left(\frac{N_{batt}}{N_{batt-série}}\right) \quad (II.73)$$

$$N_{batt-paral} = \frac{2}{1} = 2$$

#### II.4.2 Dimensionnement des câbles

Pour chaque installation photovoltaïque on doit choisir la bonne section des câbles, afin d'éviter les risques d'incendie causés par un sous-dimensionnement, en d'autres termes la surchauffe des câbles, ainsi que de réduire et d'éliminer les pertes en ligne [30].

Ce choix de section s'effectue selon deux critères :

- Le courant admissible  $I_z$  dans le câble.
- La chute de tension  $\Delta v$  admissible dans le câble

##### II.4.2.1 Section des câbles entre le panneau et la boîte de jonction :

$$I_B = 1,25 \cdot I_{cc} \quad (II.74)$$

$$S = \frac{\rho \cdot L \cdot I}{\Delta v \cdot V} \quad (II.75)$$

$$I_B = 1,25 \times 4,95 = 6,18 \text{ A}$$

$$S = \frac{0,01851 \times 2 \times 6,18}{0,01 \times 220} = 0,103 \text{ mm}^2$$

$$S_{commerciale} = 1,5 \text{ mm}^2.$$

Avec :

$I_B$  : Courant maximal d'emploi (A).

$\rho$  : Résistivité du matériau conducteur (cuivre ou aluminium) en service normal.

$L$  : Longueur du câble (m).

$S$  : Section du câble (mm<sup>2</sup>).

$\Delta v$  : chute de tension,  $\Delta v = 0,01$  (V).

$V$  : Tension à l'origine du câble (V).

##### II.4.2.2 Section des câbles entre la boîte de jonction et le régulateur DC/DC :

$$I_B = N_{pv} \cdot I_{mpp} \quad (II.76)$$

$$V = N_{pv-serie} \cdot V_{mpp} \quad (II.77)$$

$$S = \frac{\rho \cdot L \cdot I}{\Delta v \cdot V} \quad (II.78)$$

$$I_B = 5 \times 4.85 = 24.25 \text{ A.}$$

$$V = 1 \times 220 = 220 \text{ V.}$$

$$S = \frac{0.01851 \times 20 \times 6.18}{0.01 \times 220} = 1.03 \text{ mm}^2.$$

$$S_{\text{commerciale}} = 1.5 \text{ mm}^2.$$

### II.4.2.3 Section des câbles entre le régulateur DC/DC et les batteries et entre les batteries et l'onduleur :

$$U_{batt} = N_{batt} \cdot V_{batt-unit} \quad (\text{II.79})$$

$$S = \frac{\rho \cdot L \cdot P_{pv}}{\Delta v \cdot V_{batt}^2} \quad (\text{II.80})$$

$$V_{batt} = 2 \times 12 = 24 \text{ V.}$$

$$S = \frac{0.01851 \times 3 \times 400}{0.01 \times 24^2} = 3.85 \text{ mm}^2.$$

$$S_{\text{commerciale}} = 4 \text{ mm}^2.$$

### II.4.2.4 Section des câbles entre l'onduleur et la charge :

$$I_B = \frac{P_{ch}}{3 \cdot V} \quad (\text{II.81})$$

$$I_B = \frac{370}{3 \cdot 220} = 0.56 \text{ A.}$$

$$S = \beta \cdot \rho \cdot \frac{L \cdot \cos \delta \cdot I_B}{\Delta v \cdot V} \quad (\text{II.82})$$

$$S = 2 \times 0.01851 \times \frac{20 \times 0.86 \times 0.56}{0.01 \times 220} = 0.16 \text{ mm}^2.$$

$$S_{\text{commerciale}} = 1.5 \text{ mm}^2.$$

Avec :

$\beta$  : coefficient qui vaut 1 en triphasé et 2 en monophasé.

$\cos \delta$  : facteur de puissance ( $\delta$  est le déphasage entre le courant et la tension alternatifs); cette donnée est inscrite sur la fiche technique des onduleurs et vaut 1 généralement.

## II.4.3 Récapitulatif du dimensionnement

Tableau II-3: Dimensionnement des batteries.

Capacité des batteries	$C_{batt} = \frac{Bj \times Aut}{U_{batt} \times P_{DD} \times K_T}$	$C_{batt} = \frac{740 \times 1}{12 \times 0.6 \times 0.85}$	120.91 Ah
Nombre de batteries	$N_{batt} = \frac{C_{batt}}{C_{batt-unitaire}}$	$N_{batt} = \frac{120.91}{100}$	2
Nombre de batteries en série	$N_{batt-série} = \frac{V_{nom-ond}}{U_{batt}}$	$N_{batt-série} = \frac{12}{12}$	1
Nombre de batteries en parallèle	$N_{batt-paral} = Ent\left(\frac{N_{batt}}{N_{batt-série}}\right)$	$N_{batt-paral} = \frac{2}{1}$	2

Pour un volume de réservoir de 31 m<sup>3</sup> on obtient :

Tableau II-4 Dimensionnement du système pompage photovoltaïque.

Puissance hydraulique	$P_{hyd} = \varphi \times g \times Q \times HMT$	$P_{hyd} = 1000 \times 9.81 \times 8.21 \times 5$	111.99W
Constante hydraulique	$C_H = \frac{\varphi \times g}{3600}$	$C_H = \frac{1000 \times 9.81}{3600}$	2.725
Puissance mécanique	$P_{mec} = \frac{C_H \times Q \times HMT}{\eta_p}$	$P_{mec} = \frac{2.725 \times \times 5}{0.45}$	248.88W
Puissance électrique	$P_{elec} = \frac{P_{mec}}{\eta_{lm}}$	$P_{elec} = \frac{248.88}{0.85}$	299.8W
Puissance demandée	$P_{dem} = \frac{P_{elec}}{\eta_{lond}}$	$P_{dem} = \frac{299.8}{0.915}$	320W
Temps de pompage	$t_p = \frac{V}{Q}$	$t_p = \frac{31}{8.21}$	3.5h
Energie électrique journalière demandée	$E_{elec} = P_{dem} \times T_p$	$E_{elec} = P_{dem} \times T_p$	1120W
Puissance du générateur	$P_{Pv} = \frac{E_{elec}}{t_p \times (1 - pertes)}$	$P_{Pv} = \frac{1120}{3.5 \times (1 - 0.2)}$	400W
Nombre de panneaux	$N_{Pv} \geq \frac{P_{Pv}}{P_{WC}}$	$N_{Pv} \geq \frac{P_{Pv}}{P_{WC}}$	5
Nombre de panneaux en série	$N_{Pvs} = \frac{V_{nom-ond}}{V_{mpp}}$	$N_{Pvs} = \frac{12}{17.2}$	1
Nombre de panneaux en parallèle	$N_{Pvp} = \frac{N_{Pv}}{N_{Pvs}}$	$N_{Pvp} = \frac{N_{Pv}}{N_{Pvs}}$	5

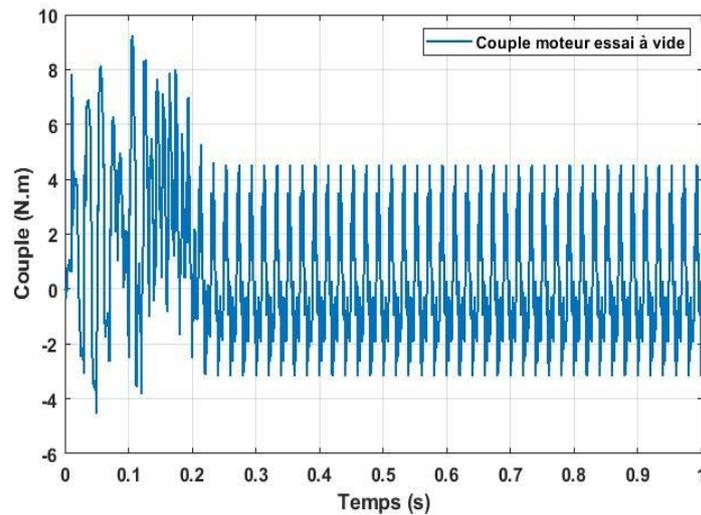
## II.5 Simulation de la machine asynchrone monophasée et la pompe

### II.5.1 Simulation de la machine asynchrone monophasée

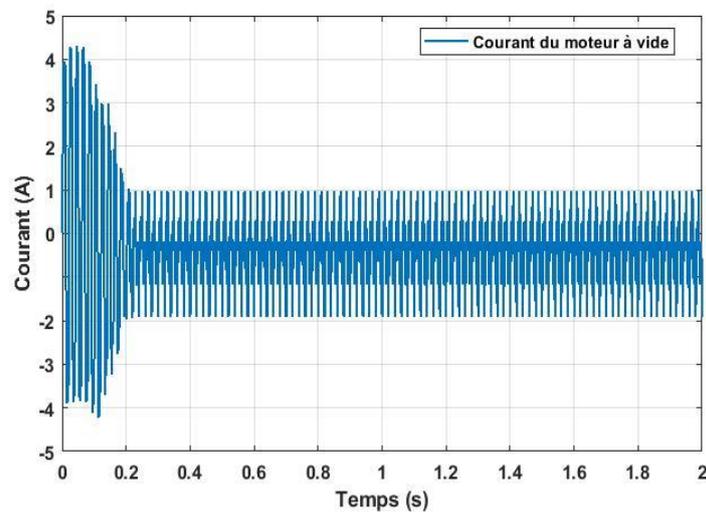
Après modélisation de notre machine asynchrone sur Matlab/Simulink, on effectue des simulations afin de pouvoir étudier son fonctionnement.

Les résultats obtenus sont représentés sur les figures suivantes :

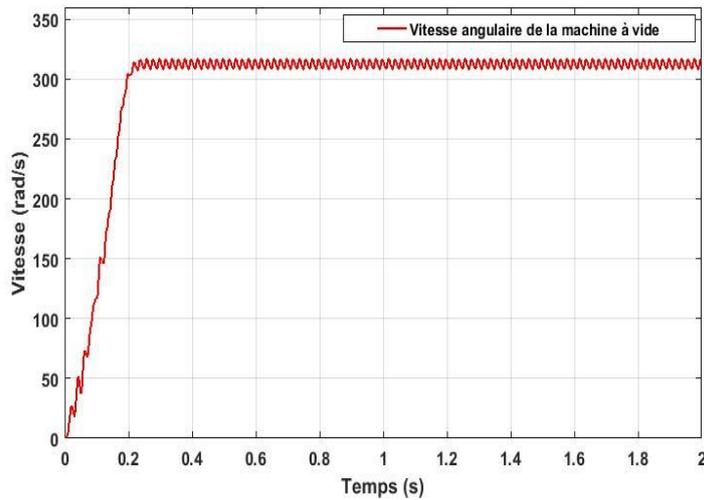
**Essai à vide :**



**Figure II-35** Couple moteur à vide.



**Figure II-36** Courant statorique du moteur à vide.



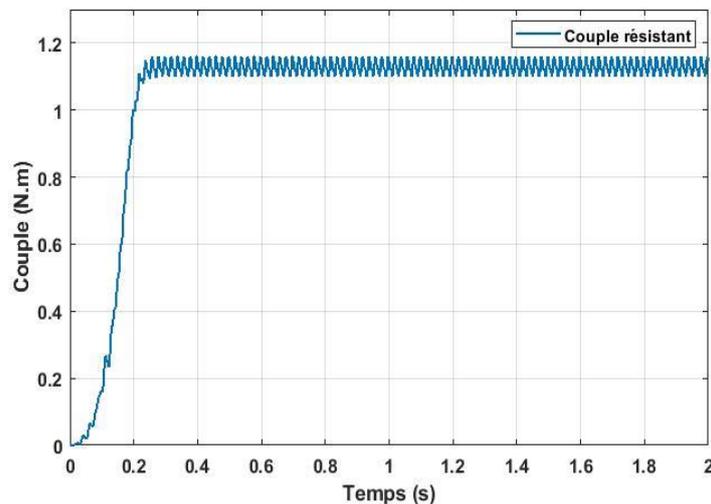
**Figure II-37** Vitesse angulaire du moteur à vide.

La Figure (II-36) représente le courant statorique de notre moteur monophasé. On constate que ce courant répond au couple électromagnétique (Figure II-32), et subit des pics au démarrage qui sont dû au régime transitoire.

La Figure (II-37) représente quant à elle la vitesse de notre machine asynchrone monophasée avec l'essai à vide.

**Essai en charge :**

Les figures suivantes représentent respectivement le couple résistant, couple moteur, courant statorique et enfin la vitesse angulaire du moteur, en charge :



**Figure II-38** Couple résistant.

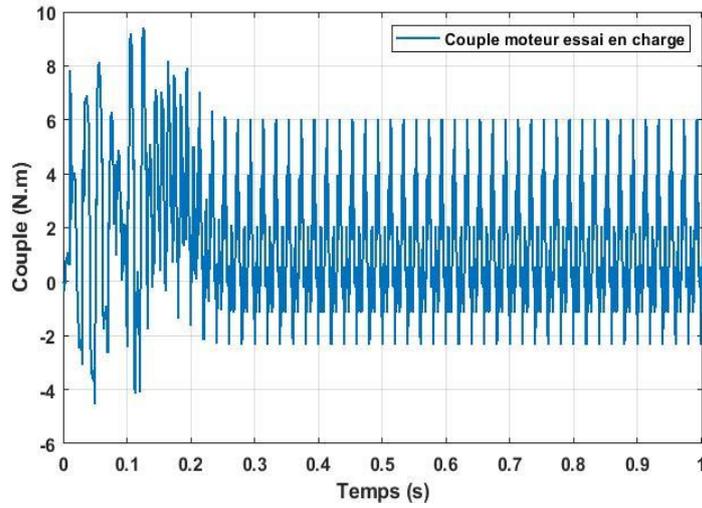


Figure II-39 Couple moteur en charge.

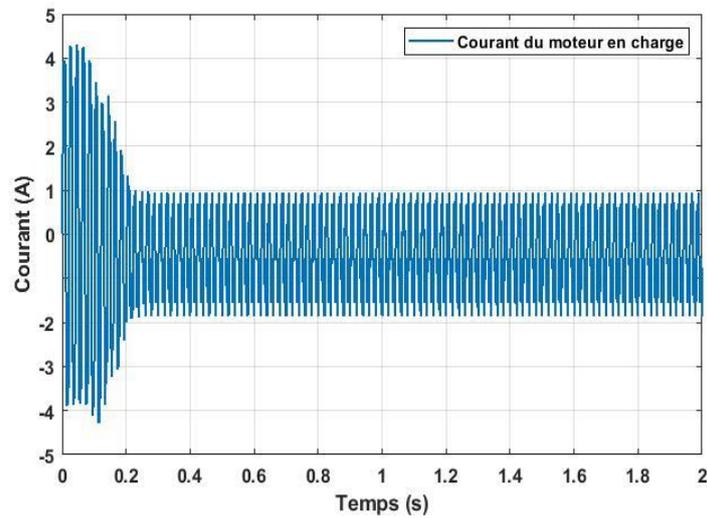


Figure II-40 Courant statorique du moteur en charge.

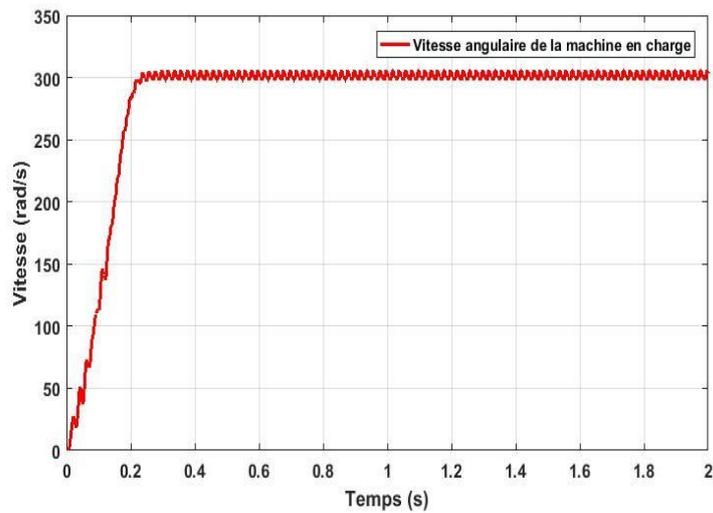


Figure II-41 Vitesse angulaire du moteur en charge.

### II.5.2 Simulation de la pompe

Les figures suivantes représentent respectivement le débit, la puissance hydraulique et la puissance mécanique de la pompe

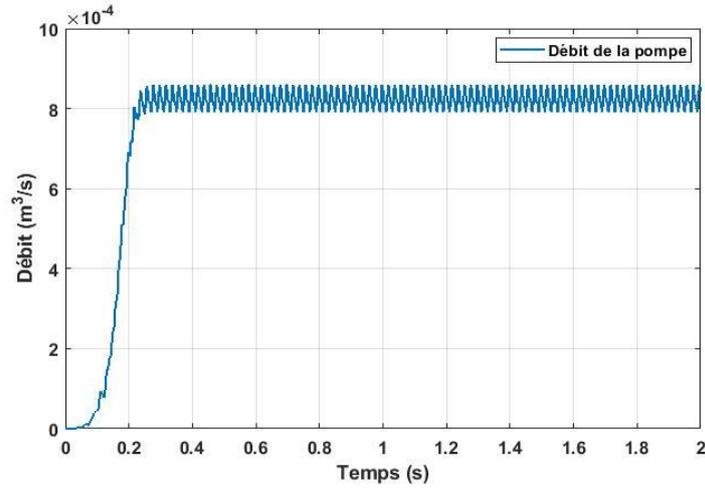


Figure II-42 Débit de la pompe.

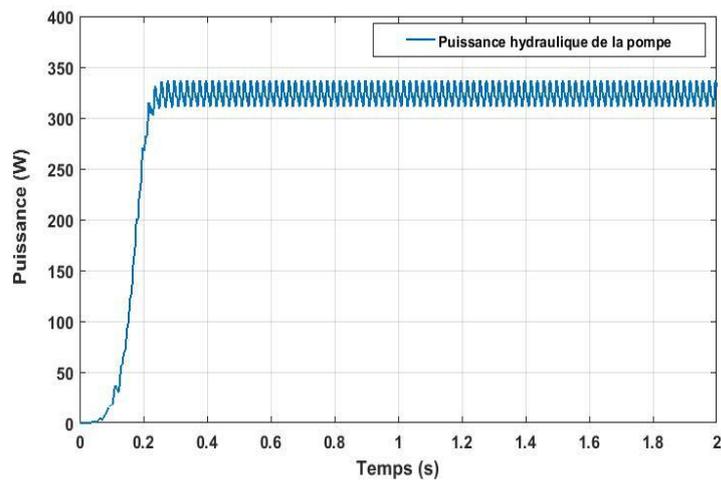


Figure II-43 Puissance hydraulique de la pompe.

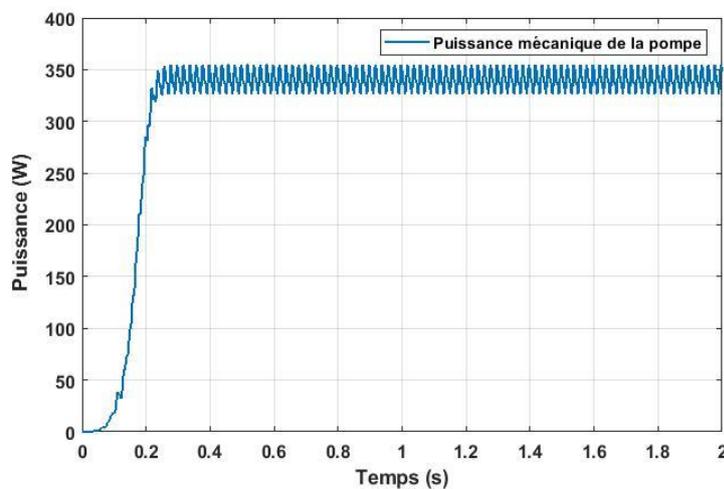


Figure II-44 Puissance mécanique de la pompe.

## **II.6 Conclusion**

Dans ce chapitre on a fait un rappel sur les équations mathématiques concernant notre système de pompage photovoltaïque, avec lesquelles on a pu modéliser chaque composant de ce dernier, et enfin on a effectué leurs simulations sur Matlab/Simulink. Pour but d'étudier chacun des résultats avec différents paramètres et conditions.

# **CHAPITRE III**

## **Gestion du système de pompage photovoltaïque**

### III Introduction

Afin d'optimiser la distribution de l'énergie entre les composants du système, on fait recours à une gestion d'énergie pour un système de pompage photovoltaïque autonome pour satisfaire les besoins de la pompe ainsi que protéger les batteries. Et dans ce chapitre on introduira les différents modes de la gestion utilisée, ainsi qu'un organigramme explicatif de cette dernière, pour enfin terminer par les différentes simulation Simulink des grandeurs étudiées de notre système de pompage photovoltaïque.

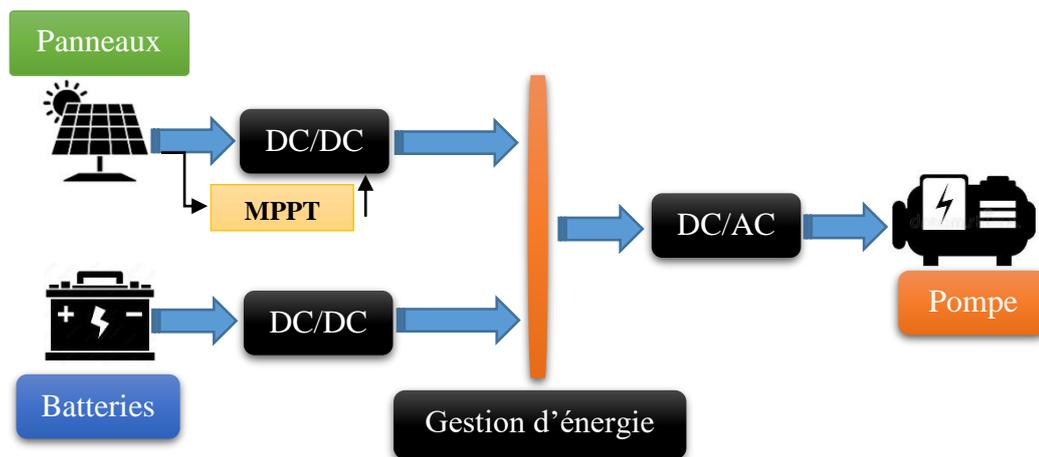


Figure III-1 Système de pompage photovoltaïque avec stockage.

#### III.1 But de la gestion utilisée

Cette gestion consiste à la vérification du niveau d'eau dans le réservoir ainsi que la puissance photovoltaïque générée, afin de choisir entre l'alimentation de la pompe avec ou sans compensation des batteries, la charge des batteries ou bien les deux en même temps selon les conditions disponibles, tout en protégeant les batteries utilisées.

#### III.2 Explication des différentes étapes principales de la gestion

Notre installation est équipée de panneaux photovoltaïques, de batteries, d'une pompe et d'un réservoir d'eau qu'on utilisera pour différentes applications durant la journée, et afin d'optimiser la distribution d'énergie on fait appel à une gestion, qui consiste à :

Pour commencer on vérifie le niveau d'eau dans le réservoir, on pose  $H_{ref}$  comme niveau de référence à ne pas dépasser, Or dans le cas où le niveau d'eau dépasse ce niveau de référence ( $H \geq H_{ref}$ ) on aura pas besoin de procéder au pompage, dans ce cas nous allons vérifier si on est dans le besoin de charger nos batteries ou pas, pour ( $P_{pv} > 0$ ,  $SOC < SOC_{max} - 90\%$ ) [33].

Et si le niveau d'eau dans le réservoir est inférieur au niveau de référence fixé ( $H < H_{ref}$ ), un pompage est nécessaire, donc on vérifie d'abord la différence entre la puissance photovoltaïque générée et celle de la pompe, pour savoir si on doit faire appel à une compensation de la part des batteries, ou si cette puissance photovoltaïque est suffisante pour alimenter notre pompe, et ainsi utiliser le surplus d'énergie dans la charge des batteries si besoin, et en priorisant cette étape si ( $SOC < SOC_{min} - 30\%$ ).

### III.3 Modes réalisés

$$\Delta P = P_{pv} - P_{pompe}$$

Avec :

$\Delta P$ : Puissance électrique nette (W).

$H \geq H_{ref}$ , donc le pompage s'arrête.

- **Mode 1** : Si la puissance générée  $P_{pv}=0$ . Le système s'arrête
- **Mode 2** : Si la puissance générée  $P_{pv}>0$ ,  $SOC < SOC_{max}$ . On charge les batteries.
- **Mode 3** : Si la puissance générée  $P_{pv}>0$ ,  $SOC \geq SOC_{max}$ . Le système s'arrête.

$H < H_{ref}$ , Pompage lancé.

- **Mode 4** : Si la puissance nette  $\Delta P > 0$ ,  $SOC < SOC_{max}$ . On effectue le pompage et on charge les batteries.
- **Mode 5** : Si la puissance nette  $\Delta P > 0$ ,  $SOC \geq SOC_{max}$ . On effectue le pompage seulement.
- **Mode 6** : Si la puissance nette  $\Delta P < 0$ ,  $P_{pv} > 0$ ,  $SOC \leq SOC_{min}$ . On priorise la charge les batteries.
- **Mode 7** : Si la puissance nette  $\Delta P < 0$ ,  $P_{pv} > 0$ ,  $SOC > SOC_{min}$ . On effectue le pompage avec la puissance générée  $P_{pv}$ , en compensant avec la puissance des batteries  $P_{batt}$ .
- **Mode 8** : Si la puissance nette  $\Delta P < 0$ ,  $P_{pv} = 0$ ,  $SOC > SOC_{min}$ . On effectue le pompage avec la puissance des batteries  $P_{batt}$  seulement
- **Mode 9** : Si la puissance nette  $\Delta P < 0$ ,  $P_{pv} = 0$ ,  $SOC \leq SOC_{min}$ . Le système s'arrête.

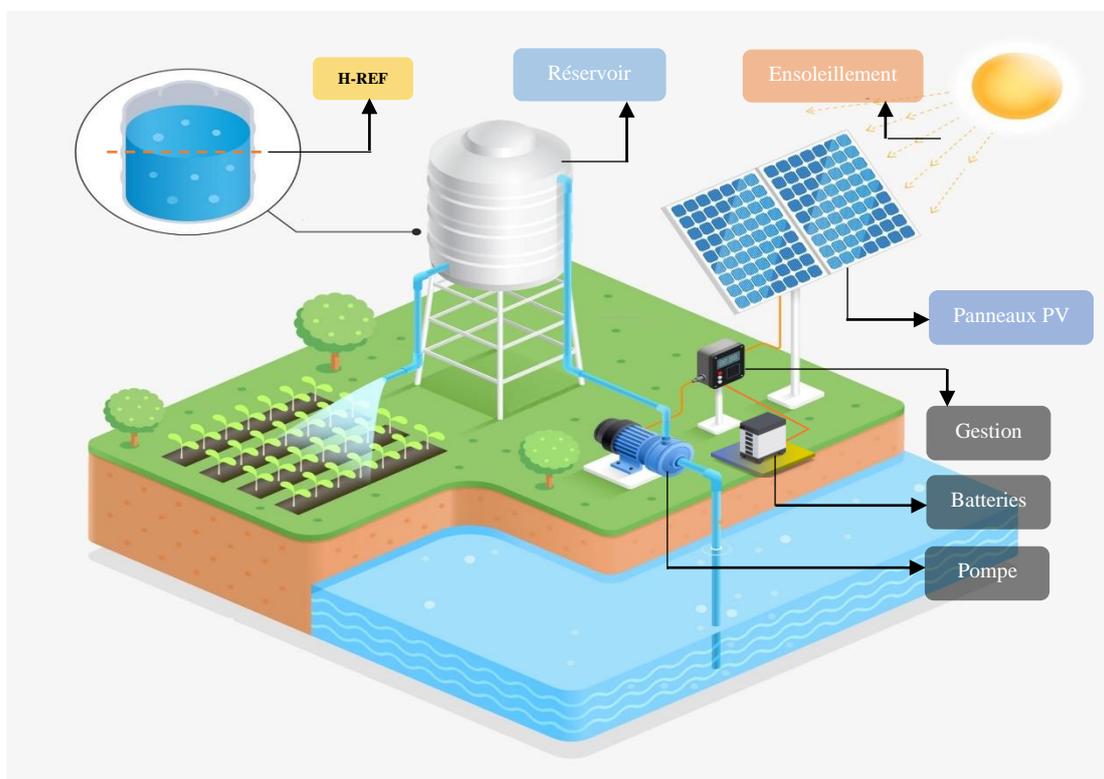


Figure III-2 Illustration explicative de la gestion de notre système.

### III.4 Organigramme

Ci-dessous l'organigramme de la gestion d'énergie proposée :

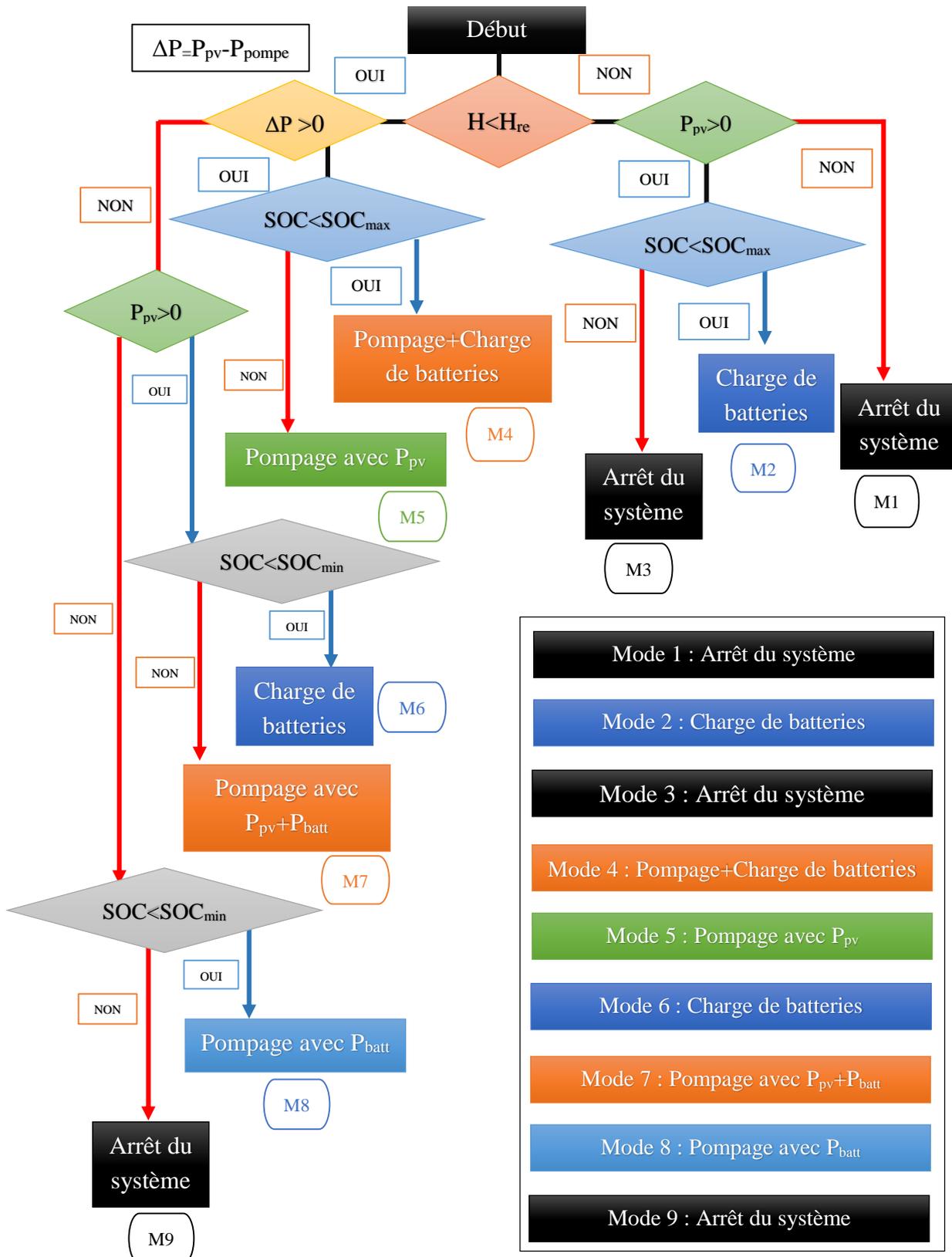


Figure III-3 Organigramme de la gestion d'énergie.

### III.5 Simulation du programme et interprétation des résultats

Les résultats suivants sont obtenus en insérant des profils de températures et d'ensoleillement au fil de la journée (pendant 24h), et ce en utilisant Simulink sur Matlab.

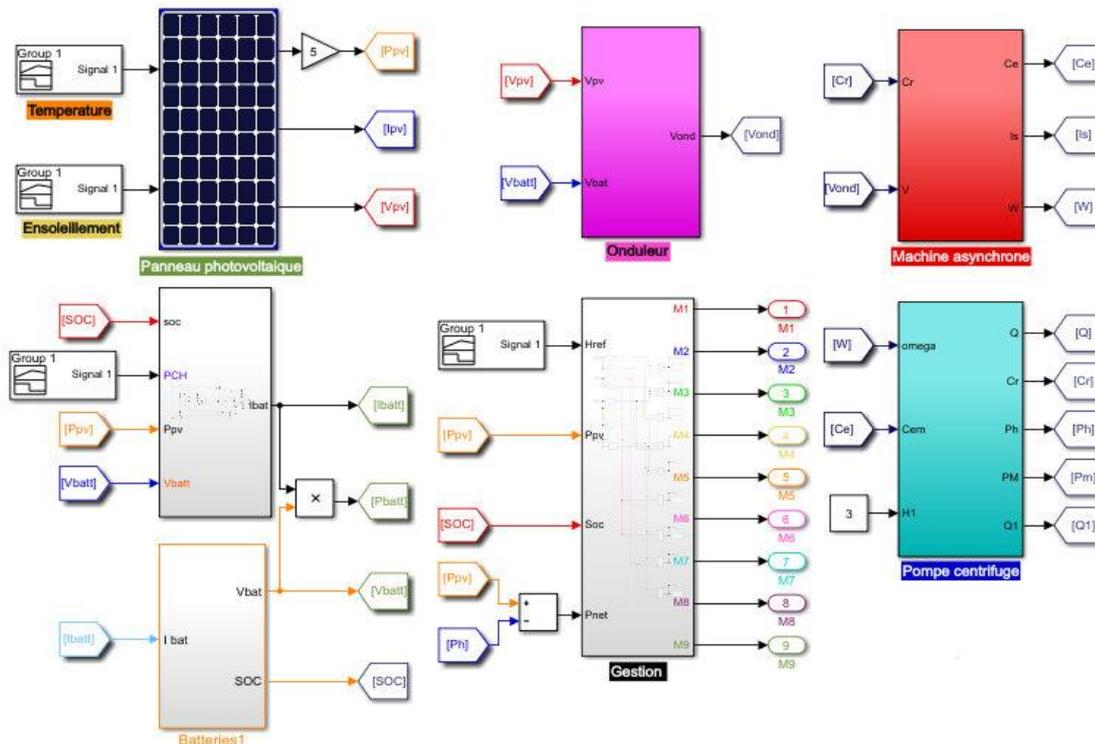


Figure III-4 Schéma bloc du système global à simuler.

### III.6 Profils utilisés

Ci-dessous, les profils de température et d'ensoleillement réels utilisés pour notre simulation :

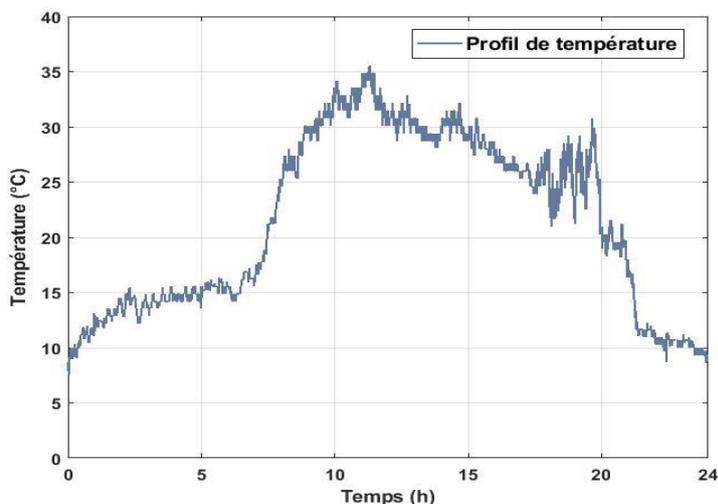


Figure III-5 Profil réel de température utilisé.

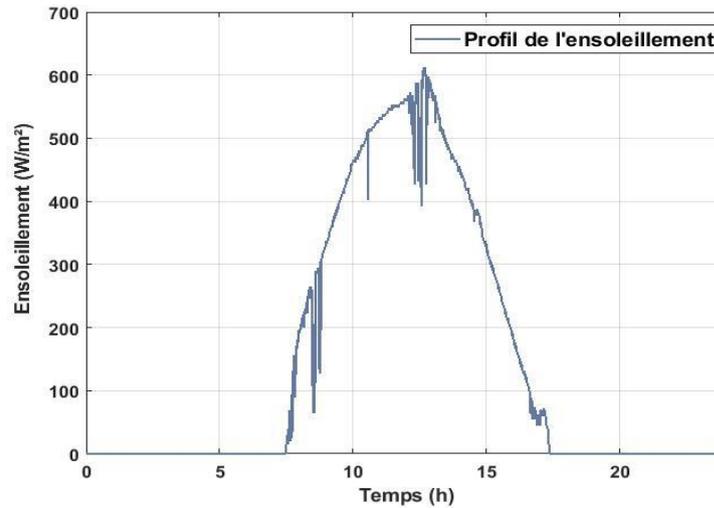


Figure III-6 Profil réel de l'ensoleillement utilisé.

### III.7 Composants du système

- 5 panneaux de 80W montés en parallèles
- 2 batteries de 100Ah/unité.

### III.8 Différentes caractéristiques obtenues avec les profils réels

Ci-dessous, les différentes caractéristiques du système obtenues après simulation :

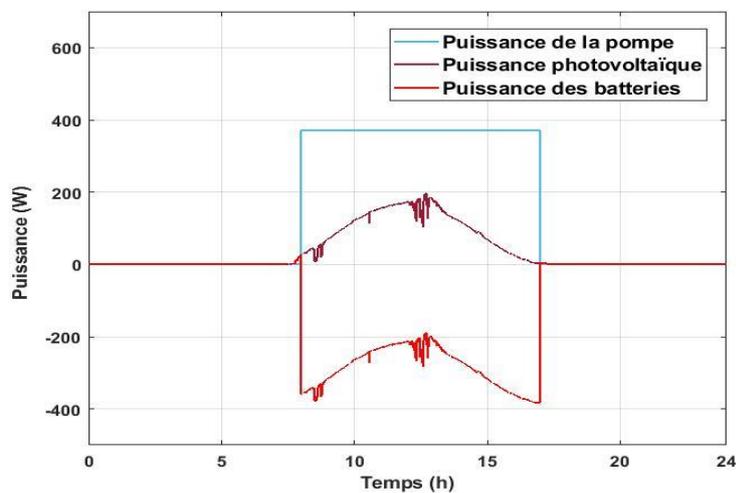


Figure III-7 Les différentes puissances obtenues.

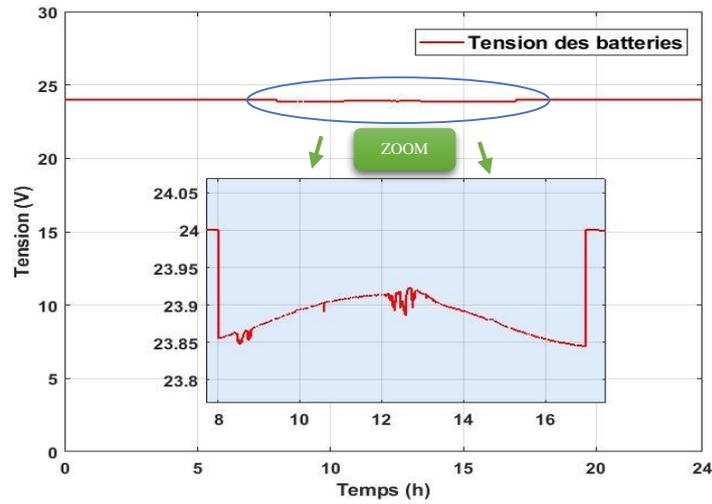


Figure III-8 Tension de batteries Vbatt.

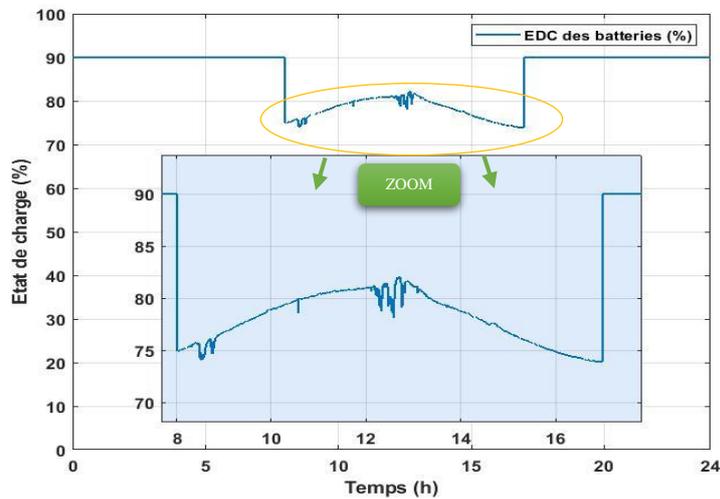


Figure III-9 Etat de charge des batteries SOC.

### III.9 Simulation avec des profils théoriques

Les figures suivantes représentent les profils de température et d'insolation utilisés pour la simulation :

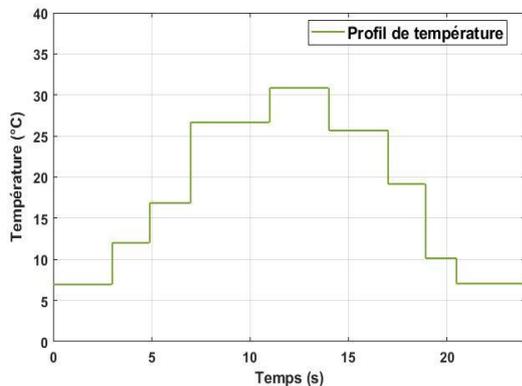


Figure III-11 Profil de température.

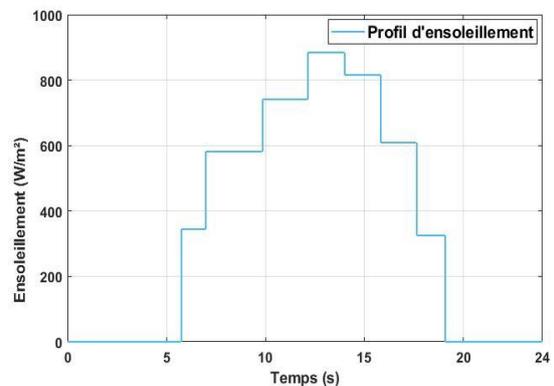


Figure III-10 Profil d'insolation.

La figure suivante représente les variations du niveau d'eau ( $H_{ref}$ ) dans le réservoir d'eau sur une période de 24h :

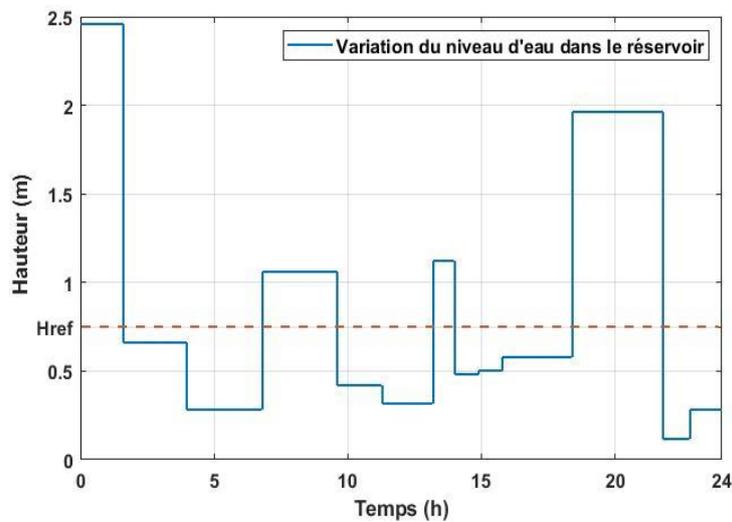


Figure III-12 Variations du niveau d'eau dans le réservoir.

### III.10 Caractéristiques obtenues avec les profils théoriques

Les figures suivantes représentent les résultats de simulation pour les différentes puissances obtenues, ainsi que la tension et l'état de charge des batteries :

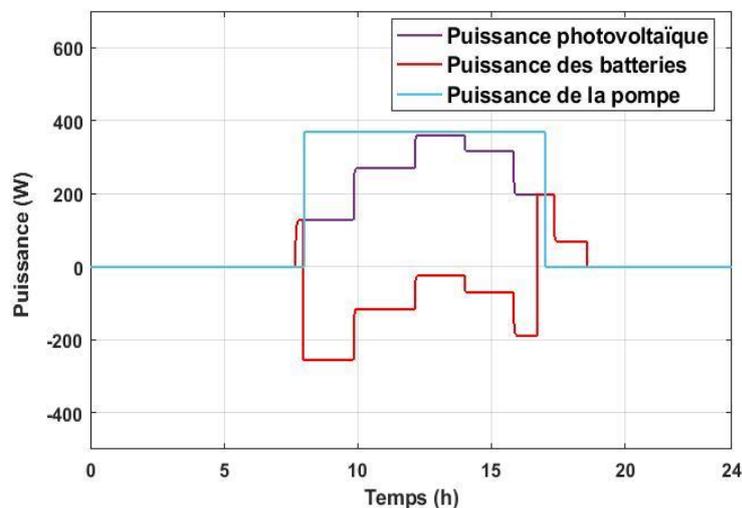
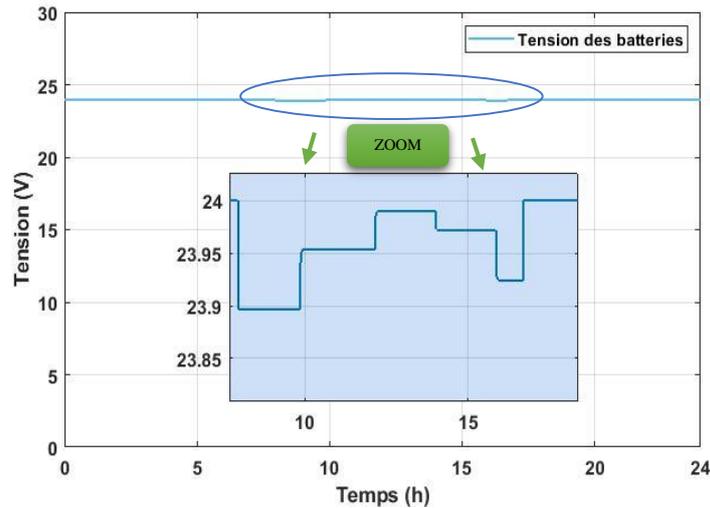
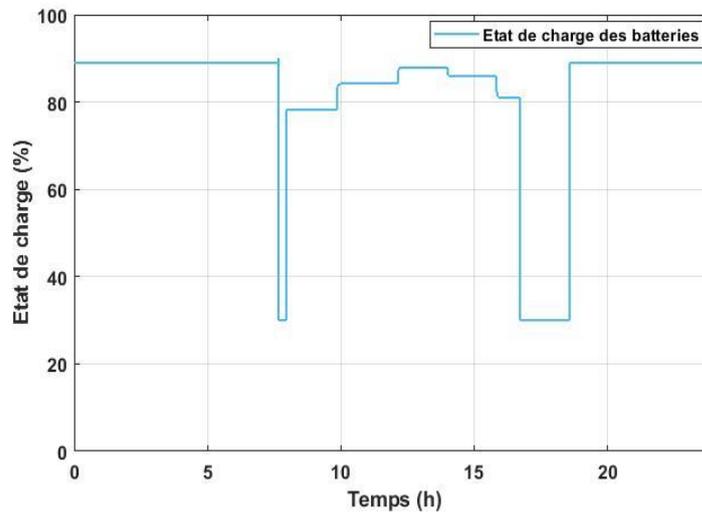


Figure III-13 Les différentes puissances obtenues.

On remarque ici que les batteries se déchargent en apportant une compensation d'énergie lorsque la puissance photovoltaïque n'est pas suffisante à elle seule pour alimenter la charge, et en se chargeant lorsqu'aucune compensation n'est nécessaire puisque on a un excès d'énergie photovoltaïque générée aux alentours de midi.



**Figure III-14** Tension de batteries  $V_{batt}$ .



**Figure III-15** Etat de charge des batteries SOC.

Après analyse des résultats de simulation, on remarque que la puissance générée par nos panneaux est proportionnelle à l'ensoleillement durant la journée, elle est minimale durant la matinée et atteint son maximum à partir de midi, et nulle durant la nuit

En ce qui concerne les batteries, on remarque qu'elles se déchargent durant les heures de pompages lorsqu'on a un manque ou absence totale de la puissance photovoltaïque, et se chargent pendant les périodes où cette dernière est abondante, suffisamment pour alimenter la pompe et charger les batteries.

### III.11 Simulation de la gestion d'énergies

Ci-dessous, les différentes allures des modes obtenus après simulation de la gestion d'énergie pour le système de pompage durant 24h :

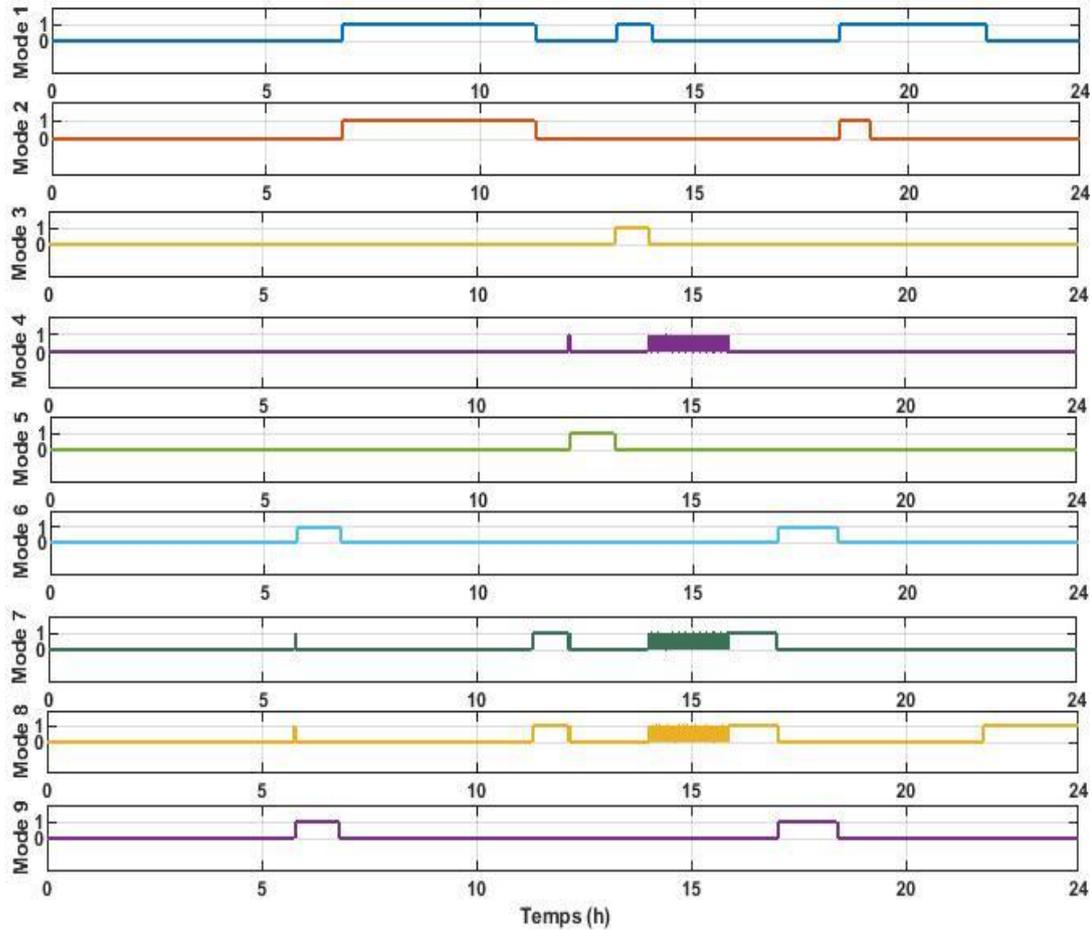


Figure III-16 Différents modes obtenus dans la gestion d'énergie.

### III.12 Conclusion

Ce chapitre s'est basé sur la présentation de la gestion d'énergie utilisée pour le système de pompage photovoltaïque avec stockage, ou des modes et un organigramme de cette gestion ont été proposés afin de garantir l'alimentation et la charge des batteries ainsi que leur protection, et enfin une modélisation de cette gestion fut réalisée sur Matlab/Simulink afin d'étudier ses différents modes par une simulation de tout le programme contenant tous les composants du système.

# **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion générale

L'énergie photovoltaïque est une énergie qui a de beaux jours devant elle. Avec les nouvelles prouesses technologiques qui ont lieu chaque année dans le secteur, cela ne fait que pallier ses défauts actuels, ce qui sera d'autant plus un avantage pour toutes ses applications tel que le pompage photovoltaïque, qui sera de plus en plus connu, fiable et performant. Ces systèmes pourront en effet couvrir plus de secteurs et régions à l'avenir, et ainsi faire face au réchauffement climatique et la sécheresse qui menacent l'environnement et la vie d'innombrables populations à travers le monde.

Ce mémoire s'est porté sur l'étude complète et détaillée d'un système de pompage photovoltaïque avec stockage, et sa modélisation sur Matlab/Simulink après avoir effectué un dimensionnement complet choisi pour une application réelle. Cela a permis de mieux comprendre son fonctionnement, ses exigences pour différentes conditions météorologiques, ses atouts et ses limites, grâce aux résultats expérimentaux et ceux de la simulation. Et enfin une gestion d'énergie fut appliquée pour optimiser le fonctionnement du système pour différentes conditions.

En perspectives de ce travail, il serait intéressant :

- De faire une gestion en utilisant des méthodes d'intelligence artificielle,
- Maximiser les puissances en utilisant d'autres méthodes de MPPT.

## Références bibliographiques

- [1] N. Chaaraoui, F. Senoussaoui, « Etudes et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire de fin d'étude, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2021.
- [2] I. Agaoua, K. Boudjemai, « Etude d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire de fin d'étude, Université Abderrahmane Mira De Bejaia, 2019.
- [3] S. Arab, D. Toudert ; « Etude d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire de fin d'étude, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017.
- [4] K. Ameer, « Étude d'un Système Photovoltaïque Muni d'un Régulateur MPPT. Application à la Conduite d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents », Mémoire de magistère, Université de Houari Boumediene, 2009.
- [5] M. Ferdjallah, « Maximisation de puissance des systèmes photovoltaïques » Thèse de Doctorat de l'Université de Bejaia, 2018
- [6] K. Dehouche, K. Mouhoubi, « Etude et Conception D'un Système de Pompage Photovoltaïque Avec Stockage Electrochimique » Mémoire de fin d'étude, Université Abderrahmane Mira De Bejaia, 2014.
- [7] W. Lalami, R. Boukerram, « Contrôle vectoriel d'un système de pompage photovoltaïque avec stockage » Mémoire de fin d'étude, Université Abderrahmane Mira De Bejaia, 2019.
- [8] C. Tubniyoma, W. Jaideawb, R. Chatthawornc, A. Suksric, T. Wongwuttanasatian, « Effect of partial shading patterns and degrees of shading on Total Cross-Tied (TCT) photovoltaic array configuration », Journal of Energy Procedia, 2018, pp. 35-41.
- [9] Principe de fonctionnement d'une pompe solaire. Disponible sur : <https://www.solaris-store.com/content/50-principe-de-fonctionnement-d-une-pompe-solaire> ( Consulté le : 11/04/2022 ).
- [10] S. Moussaoui, K. Ouali , « Etude et commande d'un système autonome de conversion d'énergie » Mémoire de fin d'étude, Université Abderrahmane Mira De Bejaia, 2019.
- [11] N. Khediri, L. Tedjini, « Etude, modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire de fin d'étude, Université Djilali Liabes de Sidi-Bel-Abbes , 2019.
- [12] Pompe centrifuge, Disponible sur : [https://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Pompe\\_centrifuge/1003071](https://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Pompe_centrifuge/1003071). ( Consulté le 03/05/2022).
- [13] Pompe volumétrique, Disponible sur : [https://www.azprocede.fr/Cours\\_GC/pompe\\_volumetrique\\_moineau.html](https://www.azprocede.fr/Cours_GC/pompe_volumetrique_moineau.html). ( Consulté le 03/05/2022).
- [14] A. Azizi, N. Boukir, « Etude d'un système solaire thermique/photovoltaïque » Mémoire de fin d'étude, Université Abderrahmane Mira De Bejaia, 2021.
- [15] Z. Meziani, « Modélisation de modules photovoltaïques », Mémoire de magistère, Université de Batna, 2012.

- [16] Smestad Greg P., Krebs Frederik C., Granqvist Claes G., Chopra Kasturi L., Mathew, X. IvanLampert, M. Carl, « Priority publishing in Solar Energy Materials and Solar Cells», Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells, 2010, pp. 1187-1190.
- [17] I. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy, « Le pompage photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Université d'Ottawa, ISBN 2-8948-006-7,1998.
- [18] S. Jaziri, K. Jemli, «Optimization Of A Photovoltaic Powered Water Pumping System», Journal of IEEE,2013, pp.422-428.
- [19] A. Daud, M. Mahmoud, «Solar powered induction motor-driven water pump operating on a desert well, simulation and field tests», Journal of Renewable Energy,2015, pp. 701-714.
- [20] C. Feraga, A. Bouldjedri, «Performance of a Photovoltaic Pumping System Driven by a Single Phase Induction Motor Connected to a Photovoltaic Generator», Journal of Automatika,2016, pp. 163-172.
- [21] Cellule photovoltaïque, Disponible sur : <https://www.edfenr.com/lexique/cellule-photovoltaique/>. ( Consulté le 27/04/2022 ).
- [22] C. Serir, «Commande D'un Système Multi-Sources Photovoltaïque/Eolien Associé à un système de stockage», Thèse de doctorat, Université Abderrahmane Mira De Bejaia,2017.
- [23] M. Arrouf, S. Ghabrou, «Commande D'un Système Multi-Sources Photovoltaïque/Eolien Associé à un système de stockage», Journal of Desalination,2007, pp. 23-30.
- [24] D. Anna Rita, R. Mario, «Photovoltaic generator modelling to improve numerical robustness of EMT simulation», Journal of Electric Power Systems Research,2012,pp.136-143.
- [25] D .Laplaze, I. Youm, «Modélisation d'une cellule photovoltaïque I: Détermination des paramètres à partir de la caractéristique courant-tension sous éclairnement», Journal of Solar Cells, 1985, pp. 167-177.
- [26] S. Boukebbous, D. Kerdoun, N. Benbaha, H. Ammar, A. Boutadara, «Effet de l' ombrage sur un système de pompage photovoltaïque», Journal of Scientific Research & Engineering Technology, 2016, pp. 14-20.
- [27] A. Mohammedi, N. Mezzai, D. Rekioua, T. Rekioua, «Impact of shadow on the performances of a domestic photovoltaic pumping system incorporating an MPPT control: A case study in Bejaia, North Algeria», Journal of Energy Conversion and Management,2014, pp. 20-29.
- [28] A. Ben Othman, M. Ben Fathallah, M. Besbes, «Robust control of a photovoltaic pumping system with super-capacitor storage, P&O algorithm and pole placement technique», Journal of Energy Systems,2019, pp. 1017-1041.
- [29] N. Ouchene, F. Idir, « Etude et réalisation d'un système photovoltaïque avec stockage », Mémoire de fin d'étude, Université Abderrahmane Mira De Bejaia,2019.
- [30] D. Rekioua, « Applications et dimensionnement des systèmes à énergies renouvelables », Cours master 2 énergies renouvelables.

- [31] G. Alonso Gutiérrez, B. Michael, V. Fernando Jiménez, A. Corinne, « Shading ratio impact on photovoltaic modules and correlation with shading patterns », *Journal of Energies*, 2018, pp. 1-26.
- [32] K. Rahrah, D. Rekioua, T. Rekioua, S. Bacha, « Photovoltaic pumping system in Bejaia climate with battery storage », *Journal of International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, pp. 13665-13675.
- [33] T. Abdoul Karim, C. Alben, D. Mamadou Lamine, A. Kodjo, M. Amadou Seidou, « Photovoltaic pumping system in Bejaia climate with battery storage », *Journal of Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies*, 2016, pp. 1-8.
- [34] R. Abdessemed, « Modélisation et simulation des machines électriques », Paris: Ellipses, 2011. Print.
- [35] Dr A. Sahi, « Définition et description générale des turbo machines », Cours 3eme année énergétique.
- [36] Caractéristique courant-tension d'une cellule, Disponible sur : [http://www.photovoltaique.guidenr.fr/informations\\_techniques/propriete-electrique-module-photovoltaique/caracteristique-courant-tension-cellule.php](http://www.photovoltaique.guidenr.fr/informations_techniques/propriete-electrique-module-photovoltaique/caracteristique-courant-tension-cellule.php). ( Consulté le : 27/04/2022).
- [37] L'effet photovoltaïque, Disponible sur : <https://www.photovoltaique.info>, (Consulté le 11/04/2022).
- [38] 1905, l'année où Einstein bouleverse la physique moderne, Disponible sur : <https://www.sciencesetavenir.fr>, (Consulté le 19/04/2022).
- [39] Moteur monophasé (condensateur de démarrage, Disponible sur : <http://electronique71.com/moteur-monophasé-condensateur-de-démarrage/>, (Consulté le 04/05/2022).