

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

*Université Abderrahmane Mira-Bejaia*

*Faculté de la Technologie*

*Département de Génie Electrique*

# *Projet de Fin d'Etudes*

**En vue de l'obtention du diplôme Master en Génie *Electrique***

**Option : Énergie renouvelable**

## Thème

**Etude et Conception D'un Système de Pompage  
Photovoltaïque Avec Stockage Electrochimique**

**Promoteur:**

**T.REKIOUA**

**Dj. REKIOUA**

**Réalisé par:**

**DEHOUCHE Karima**

**MOUHOUBI Kahina**

**2013/2014**

## *Remerciement*

*Nous louons Dieu pour nous avoir prêtés la vie, aide et patience tout le long de ce cycle universitaire.*

*Nous tenons vivement à exprimer toute notre reconnaissance à*

- ✓ Nos deux promoteurs Mme DJ.Rekioua et Mr T. Rekioua  
D'avoir accepté de diriger ce travail, pour leurs confiances et leurs disponibilités qu'ils nous ont attribué.*
- ✓ Aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.*
- ✓ Tout le groupe avec lequel on a partagé de très bons moments au laboratoire LTII ou notre projet a été réalisé.*
- ✓ Toutes les personnes qui ont contribué de prêt ou de loin à ce que nous sommes aujourd'hui, merci à tous.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce manuscrit à mes chers parents qui m'ont Encouragé à donner le meilleur de moi-même, et qui m'ont fourni Les moyens d'être ce que je suis aujourd'hui.*

*Je le dédie aussi à mes soeurs, à mes frères et à toute la famille. Je leurs souhaite Une vie pleine de succès. Que dieu les garde tous.*

*Je le dédie aussi à mes belles soeurs, à mes beaux frères et à toute ma belle famille. Je leurs souhaite Une vie pleine de succès. Que dieu les garde tous.*

*Et surtout a mon marie qui ma soutenus dans mes études je lui souhaite une très belle vie et beaucoup de réussite.*

*A tous les êtres chers à mon  
coeur. Dehouche. Karima*

## Sommaire

### *Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques*

I.1 Introduction.....	2
I.2 Energies renouvelables .....	2
I.2.1 Énergie solaire .....	3
I.2.1.1 L'effet photovoltaïque .....	4
I.2.1.2 Le principe de conversion photovoltaïque.....	4
I.3 La cellule photovoltaïque.....	5
I.3.1 Les différents types de cellule photovoltaïque.....	7
➤ Les cellules monocristallines .....	7
➤ Avantage .....	7
➤ Inconvénients .....	7
➤ Les cellules poly cristallines .....	8
➤ Avantage .....	8
➤ Inconvénient .....	8
➤ Les cellules amorphe.....	8
➤ Avantage.....	9
➤ Inconvénients : .....	9
➤ Les cellules en couches minces.....	9
➤ Les cellules en polymère : .....	9
➤ Les cellules à multi-jonction : .....	10
➤ Module à l'arséniure de gallium (GaAs) : .....	10
➤ Le diséluniure de cuivre et d'indium + sulfure de cadmium (CIS) : .....	10
➤ Le dioxyde de titane ou rutile (TiO <sub>2</sub> ) : .....	11
➤ Les cellules à concentration .....	11
I.3.2 Caractéristique électrique d'une cellule solaire photovoltaïque .....	11
➤ Caractéristique courant-tension .....	11
➤ Caractéristique puissance-tension.....	12
I.3.2.1 Influence de l'éclairement.....	12
I.3.2.2 Influence de la température.....	12
I.4 Le générateur photovoltaïque et ses performances .....	13
I.4.1 Association de cellules photovoltaïques en série.....	13

# Sommaire

---

I.4.2 Association de cellules photovoltaïques en parallèle : .....	14
I.5 Les systèmes photovoltaïques.....	14
I.5.1 Les systèmes photovoltaïques autonomes : .....	15
a. Systèmes autonomes sans stockage électrochimique.....	15
b. Systèmes autonomes avec stockage électrochimique .....	15
I.5.2 Systèmes photovoltaïques connectée au réseau.....	16
I.5.3 Les systèmes de pompage photovoltaïque.....	16
I.5.3.1 Les différents types de pompage photovoltaïque.....	17
I.5.3.2 Le pompage au fil de soleil.....	17
a. Le pompage avec stockage hydraulique.....	18
b. Le pompage avec stockage électrochimique (batteries).....	18
b.1 Système de stockage électrochimique.....	18
b.1.2 Principe de fonctionnement d'une batterie .....	18
b.1.3 Caractéristique d'une batterie.....	19
b.2 Les divers types de batteries .....	20
b.2.1 Les batteries au plomb ou plomb-acide.....	20
b.2.2 Les batteries au nickel-cadmium .....	20
b.2.3 Les batteries au nickel-zinc .....	21
b.2.4 Les batteries sodium chlorhure de nickel .....	21
b.2.5 Les batteries lithium-ion.....	21
b.2.6 Les batteries lithium-ion polymères .....	22
b.2.7 Les batteries métal-hydrures métallique.....	22
I.5.3.3 Les différents composants d'un système de pompage photovoltaïque.....	24
I.5.3.3 .1 Sous système de pompage .....	24
I.5.3.2 .2 Groupe moteur-pompe .....	24
a. Pompe.....	24
a.1 Pompes centrifuges.....	25
a. 2 Pompes volumétriques.....	25
b. Moteurs.....	26
b. 1 Moteur à courant continu.....	26
b. 2 Moteur à courant alternatif .....	27
b.2.1 Les moteurs universels .....	27
b.2.2 Les moteurs synchrones.....	27

# Sommaire

---

b.2.3 Les moteurs asynchrones .....	28
I.5.3.4 Les convertisseurs statiques .....	28
a. Convertisseur DC/DC (hacheur) .....	28
a.1 Hacheur dévolteur (ou série) .....	28
a.2 Hacheur survolteur (ou parallèle) .....	29
b. Convertisseur DC/AC (onduleur) .....	29
I.6 Objectif de mémoire .....	30
I.6.1 Descriptions de l'installation .....	31
I.7 Conclusion .....	31

## *Chapitre II : Modélisation et simulation des systèmes photovoltaïque*

II.1 Introduction : .....	32
II.1.1 La cellule solaire : .....	32
II.1.1.1 Paramètres d'une cellule photovoltaïque : .....	32
➤ Courant de court circuit $I_{cc}$ : .....	32
➤ Tension circuit ouvert $V_{co}$ : .....	32
➤ Température de jonction : .....	33
➤ Facteur de Forme : .....	33
➤ Rendement de conversion : .....	33
➤ La puissance du flux lumineux incident : .....	33
II.2 Modélisation et simulation de la cellule photovoltaïque : .....	34
II.2.1 Cellule idéale : .....	34
II.2.2 Le modèle explicite : .....	35
➤ Détermination des paramètres $C_i$ : .....	36
II.2.3 Modèle à deux diodes : .....	36
II.2.4 Le modèle à une diode : .....	38
➤ Détermination des paramètres du modèle : .....	40
II.2.5 Modèle simplifié du modèle à une diode : .....	40
➤ Les paramètres du panneau Suntech sous conditions (STC) : .....	42
➤ Calcule du nombre du panneau photovoltaïque : .....	42
II.3 Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ du générateur photovoltaïque : .....	42
➤ Influence de l'ensoleillement : .....	43

# Sommaire

---

Discussion des résultats .....	43
➤ Influence de la température : .....	44
Discussion des résultats : .....	45
II.3 Conclusion : .....	45

## *Chapitre III : Modélisation et simulation de système de pompage*

III.1 Introduction : .....	46
III.1.1 Modélisation de moteur asynchrone monophasé .....	46
III.1.1.1 Généralités sur les moteurs asynchrones monophasés .....	46
III.1.1.2 Constitution : .....	47
➤ le stator .....	47
➤ Le rotor .....	47
III.1.3 Principe de fonctionnement .....	47
III.1.4 Principe de démarrage .....	48
III.1.5 La modélisation de la machine asynchrone monophasée .....	49
➤ Hypothèses simplificatrices .....	49
➤ Les équations des tensions .....	49
III.1.6 Modèle de la machine électrique généralisé .....	50
III.1.7 Le système d'équation des tensions électriques de la MASMCP .....	51
➤ Equation du couple électromagnétique .....	53
➤ Equation mécanique .....	53
➤ Simulation de la machine asynchrone monophasée .....	54
III.2 Modélisation de l'onduleur de tension monophasé .....	56
III.3 Modélisation de la pompe centrifuge .....	57
III.3.1 Données de base .....	57
➤ Débit .....	57
➤ Hauteur manométrique totale .....	58
➤ Niveau statique .....	58
➤ Niveau dynamique .....	58
➤ Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire .....	58
III.4 Modélisation de la batterie .....	59
III.4.1 Le modèle électrique .....	59
III.5 Simulation du système de pompage sous matlab .....	60

# Sommaire

---

III.5.1 Résultat de simulation .....	61
➤ Du coté bus Continus.....	61
➤ Du coté alternative.....	61
➤ Du coté motopompe.....	62
III.6 Conclusion.....	63

## *Chapitre IV: Résultats expérimentaux*

IV. 1. Introduction.....	64
IV. 3. Présentation de différentes caractéristiques du système : .....	65
IV.3.1 ESSAI N°1 .....	65
IV.3.1.1 Du coté bus continus:.....	65
➤ Hauteur de pompage à 1 mètre.....	65
➤ Hauteur de pompage à 3mètres .....	66
➤ Hauteur de pompage à 5 mètres .....	66
IV.3.1.2 Du coté Pompe .....	66
Hauteur de pompage à 1 mètres .....	66
Hauteur de pompage à 3 mètres .....	66
Hauteur de pompage 5 mètres .....	66
IV.3.1.3 Du coté Courant alternatives.....	67
➤ Tension d'alimentation du moteur .....	67
Hauteur de pompage à 1 mètre .....	67
Hauteur de pompage à 3 mètre .....	68
Hauteur de pompage à 5 mètre .....	68
➤ Courant d'alimentation du moteur .....	69
Hauteur de pompage à 1 mètres .....	69
Hauteur de pompage à 3 mètre .....	69
Hauteur de pompage 5 mètres .....	69
IV.3.2 ESSAI N°2 .....	70
IV.3.2.1 Du coté bus continus:.....	70
➤ Hauteur de pompage 1 mètre .....	70
➤ Hauteur de pompage 3 mètre.....	70



## Sommaire

---

➤ Hauteur de pompage 5 mètre .....	71
IV.3.3 ESSAI N°3 .....	72
IV.3.3.1 Du coté bus continu .....	72
➤ Hauteur de pompage 1 mètre .....	72
➤ Hauteur de pompage 3 mètre .....	73
➤ Hauteur de pompage 3 mètre .....	73
Conclusion.....	73

# Liste des figures

---

## Liste des figures

### *Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques*

Figure (I.1): Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque.....	5
Figure (I.2) : présentation schématique d'une cellule solaire. ....	6
Figure (I.3): schéma équivalent d'une cellule solaire. ....	7
Figure (I.4) : Cellules photovoltaïques monocristallines. ....	7
Figure (I.5) : Cellules photovoltaïques poly cristallines. ....	8
Figure (I.6) : Cellules photovoltaïques amorphe.....	9
Figure (I.7) : Caractéristique $I=F(V)$ d'une cellule solaire. ....	11
Figure (I. 8) : Caractéristique $P=F(V)$ d'une cellule solaire. ....	12
Figure (I.9) : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque pour différents éclairagements. ....	12
Figure (I.10) : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque pour différents température.....	13
Figure (I.11): Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques. ....	14
Figure (I.12) : Caractéristique résultante d'un groupement constitué de $N_p$ cellules identiques en parallèle. ....	14
Figure (I.13) : Configuration générale d'un système de pompage photovoltaïque.....	16
Figure (I.14): Caractéristique du pompage avec batteries.....	17
Figure (I.15): Caractéristique du pompage avec batteries.....	23
Figure (I.16) : Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge. ....	25
Figure (I. 17): Caractéristiques d'une pompe volumétrique .....	26
Figure (I. 18) Schéma explicatif de l'installation du pompage photovoltaïque. ....	31

### *Chapitre II : Modélisation du générateur photovoltaïque*

Figure (II-1): Modèle d'une cellule photovoltaïque idéale. ....	34
Figure (II-2) : Modèle d'une cellule photovoltaïque à deux diodes.....	37
Figure (II-3) : Modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode. ....	38
Figure (II.4) : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv}= f(V_{pv})$ .....	43
Figure (II.5) : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv}= f(V_{pv})$ .....	43
Figure(II.6) : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ .....	44

## Liste des figures

---

Figure(II.7) : Influence de la température sur la caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$ ..... 45

### *Chapitre III : Modélisation et simulation de système de pompage*

Figure (III.1) : Schéma électrique de moteur avec enroulement auxiliaire et condensateur de démarrage. .... 48

Figure (III.2) : Représentation schématique de la machine asynchrone monophasée à condensateur permanent(MASMCP) ..... 49

Figure (III.3) : Représentation schématique de la machine asynchrone monophasée. .... 50

Figure (III.4) : Représentation des axes ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) de la machine asynchrone monophasée. .... 50

Figure (III.5) : Schéma de simulation machine asynchrone monophasé a condensateur permanent. .... 54

Figure (III.6) : Couple moteur à vide. .... 54

Figure (III.7) : Courant du moteur à vide. .... 54

Figure (III.8) : Vitesse du moteur à vide. .... 55

Figure (III.9) : Vitesse du moteur en charge. .... 55

Figure (III.10) : Couple du moteur en charge. .... 55

Figure (III.11) : Courant du moteur en charge. .... 56

Figure (III.12) : Onduleur monophasé. .... 56

Figure (III.13) : Bloc Simulink onduleur monophasé. .... 57

Figure (III.14) : Bloc Simulink de la pompe centrifuge. .... 59

Figure (III.15) : Schéma équivalent du modèle électrique. .... 59

Figure (III.16) : Bloc Simulink de la batterie. .... 60

Figure (III.17) : Ensoleillement de 3 jours. .... 61

Figure (III.18) : Courant photovoltaïque et batterie. .... 61

Figure (III.19) : Courant d'alimentation moteur. .... 62

Figure (III.20) : Tension d'alimentation du moteur. .... 62

Figure (III.21) : Vitesse du moteur. .... 62

Figure (III.22) : Couple électromagnétique et résistant. .... 63

Figure (III.23) : Débit de pompage ..... 63

### *Chapitre IV : Résultats expérimentaux*

Figure (IV.1) : Schéma complet de l'installation réalisée de pompage PV ..... 64

## Liste des figures

---

Figure (IV.2) : Ensoleillement du 18/05/2014 de 8h00 à 18h00.....	65
Figure (IV.3) : Courants photovoltaïque et batterie à 1 mètre .....	65
Figure (IV.4) : Courant bus continu à 1 mètre.....	65
Figure (IV.5) : Courants photovoltaïque et batterie à 3 mètres.....	66
Figure (IV.6) : Courant bus continu à 3mètres .....	66
Figure (IV.7) : Courant photovoltaïque et batterie à 5 mètres .....	66
Figure (IV.8) : Courant bus continu à 5mètres .....	66
Figure (IV.9) : Débit à 1m de hauteur .....	67
Figure (IV.10) : Débit à 3m de hauteur .....	67
Figure (IV.11) : Débit à 5m de hauteur .....	67
Figure (IV.12) : Débit à differente hauteurs.....	67
Figure (IV.13) : Tension de l'onduleur à 1 mètres.....	68
Figure (IV.14) : Tension de l'onduleur à 3 mètres.....	68
Figure (IV.15) : Tension de l'onduleur à 5 mètres.....	68
Figure (IV.16) : Courant d'alimentation à 1 mètre .....	69
Figure (IV.17) : Courant d'alimentation à 3 mètres.....	69
Figure (IV.18) : Courant d'alimentation à 5 mètres.....	69
Figure (IV.19) : Courant d'alimentation à differente hauteurs .....	69
Figure (IV.20) : Ensoleillement du 21/05/2014 de 8h00 à 18h00.....	70
Figure (IV.21) : Courants photovoltaïque et batterie à 1 mètre .....	70
Figure (IV.22) : Courant bus continu à 1 mètre.....	70
Figure (IV.23) : Courants photovoltaïque et Batterie à 3 mètres .....	71
Figure (IV.24): Courant bus continu à 3 mètre.....	71
Figure (IV.25) : Courants photovoltaïque et batterie à 5 mètres.....	71
Figure (IV.26) : Courant bus continu à 5 mètre.....	71
Figure (IV.27) : Ensoleillement du 26/05/2014 de 8h00 à 18h00.....	72
Figure (IV.28) : Courants photovoltaïque et batterie à 1 mètre .....	72
Figure (IV.29) : Courant bus continu à 1 mètre.....	72
Figure (IV.30) : Courants photovoltaïque et batterie à 3 mètres.....	73
Figure (IV.31): Courant bus continu à 3 mètre.....	73
Figure (IV.32) : Courants photovoltaïque et batterie à 5 mètres.....	73
Figure (IV.32) : Courant bus continu à 5 mètre.....	73

# Liste des tableaux

---

## *Liste des tableaux*

### *Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques*

Tableau (I.1) : Caractéristiques des différents types de batteries.....	23
---	----

### *Chapitre II : Modélisation et simulation des systèmes Photovoltaïques*

Tableau (II.1) : Paramètres obtenus du modèle explicite.....	36
Tableau (II.2) : Paramètres obtenus du modèle à deux diodes du panneau .....	38
Tableau (II. 3) : Paramètres obtenu du modèle à une diode.....	40
Tableau (II. 4) : Plaque signalétique du panneau photovoltaïque Suntech .....	42

# *Introduction Générale*

## Introduction général

De nos jours, l'homme dispose de nombreuses sources d'énergie, les plus utilisées sont les énergies dites fossiles (charbon, Pétrole, gaz) ...etc.

Les réserves d'énergie fossiles commencent à diminuer et lors de leur utilisation engendrent une grande quantité de gaz à effet de serre (dioxyde de Carbone) qui participent fortement au réchauffement planétaire [1].

De nombreuses énergies non polluantes et renouvelables abondantes Partout à la surface de la terre pourraient pourtant être utilisées par l'homme, parmi elle on distingue l'énergie éolienne, l'énergie Hydroélectrique et l'énergie solaire qui est la plus intéressante car, L'énergie solaire est disponible partout à la surface du globe, en quantité égale dans l'année, et Elle est de plus facile à exploiter. Elle semble être l'énergie la plus prometteuse pour l'avenir.

On distingue deux types d'application de l'énergie solaire [9]

- l'énergie solaire thermique : cette application consiste à transformer les rayonnements solaires en chaleur soit pour utilisation directe ou indirecte.
- L'énergie solaire photovoltaïque : la production d'électricité à partir des rayonnements solaires est appelé effet photovoltaïque, en effet à partir de son nom on peut tirer deux mots photo pour les photons et volta pour la tension.

Parmi ces applications, la plus intéressante est l'énergie solaire photovoltaïque on effectue cette dernière peut être utilisée pour alimenter des sites isolés ou faire le pompage de l'eau pour la consommation et l'irrigation en agriculture [1].

L'eau est indispensable pour l'être humain, malgré sa beaucoup de sites ne dispose pas de cette source pour cette raison on a recours au pompage de l'eau mais le pompage nécessite de l'énergie électrique qui n'est pas disponible partout, donc l'énergie solaire photovoltaïque s'avère très intéressante [1].

# *Chapitre I*

## *Généralités sur les systèmes photovoltaïques*



### **I.1 Introduction**

Au rythme de consommation actuelle des ressources énergétiques les gisements d'énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz) et fissiles (uranium), même selon les scénarios les plus extrêmes, ne représentent plus que quelques dizaines d'années ou au mieux un peu plus d'un siècle pour le cas de charbon. La situation est d'autant plus alarmante que la demande énergétique va en grandissant. Le photovoltaïque, ayant comme source le soleil (énergie quasi inépuisable à l'échelle humaine), se positionne comme une solution à l'épuisement des ressources d'énergies fossiles. Malheureusement, bien que la production d'énergie renouvelable soit en forte expansion ces dernières années, provient encore des énergies fossiles et fissiles.

L'énergie photovoltaïque permet de transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique, cette énergie s'avère très intéressante pour les systèmes de pompage surtout pour les sites isolés. Cette dernière présente des avantages parmi elle :

- Energie indépendant.
- Le combustible est gratuit (le rayonnement solaire).
- Entretien minimale.
- Génère l'énergie requise.
- Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
- Aucun bruit.
- Non polluante.
- L'extension des systèmes est facile.

Et parmi ces inconvénients:

- Le cout actuel de la technologie PV est beaucoup plus élevé que celui de l'énergie traditionnelle.
- Ils sont dépendants des conditions météorologiques.
- Ils ne conviennent pas aux utilisations à forte consommation.

### **I.2 Energies renouvelables**

Une énergie renouvelable (*ER*) est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à échelle humaine de temps. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les

astres, principalement le Soleil (*rayonnement*), mais aussi la Lune (*marée*) et la Terre (*énergie géothermique*). Elles sont issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, des chutes d'eau, des marées ou encore des végétaux. Leur exploitation engendre très peu de déchets et d'émissions polluantes [2].

On peut rencontrer plusieurs types des énergies renouvelables, telle que l'énergie hydraulique, géothermique, marémotrice, mais les principales énergies renouvelables pouvant produire les quantités nécessaires d'énergies électriques et pouvant contribuer à subvenir en besoin énergétique sont les éoliennes et en grande partie *l'énergie solaire*.

### I.2.1 Énergie solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de  $0,22\mu\text{m}$  à  $10\mu\text{m}$  [1].

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

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

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de  $1376 \text{ W/m}^2$ , a plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement  $1200 \text{ W/m}^2$ . La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus [9].

### **I.2.1.1 L'effet photovoltaïque**

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire [2].

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives [1].

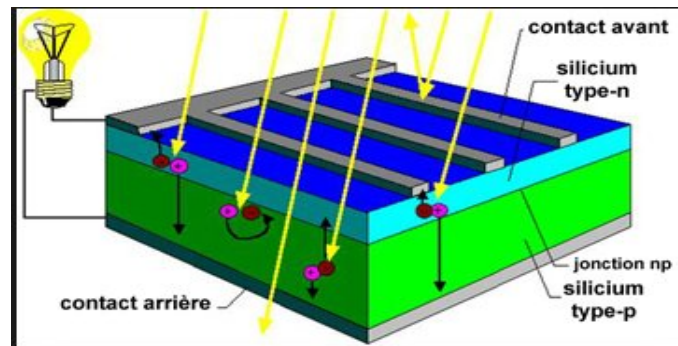
Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés on trouve le silicium, le germanium, le sulfure de Gallium et l'arséniure de Gallium.

### **I.2.1.2 Le principe de conversion photovoltaïque**

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée [2]. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un pair électron - trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les

électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule [3, 4].



**Figure I.1:** Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque

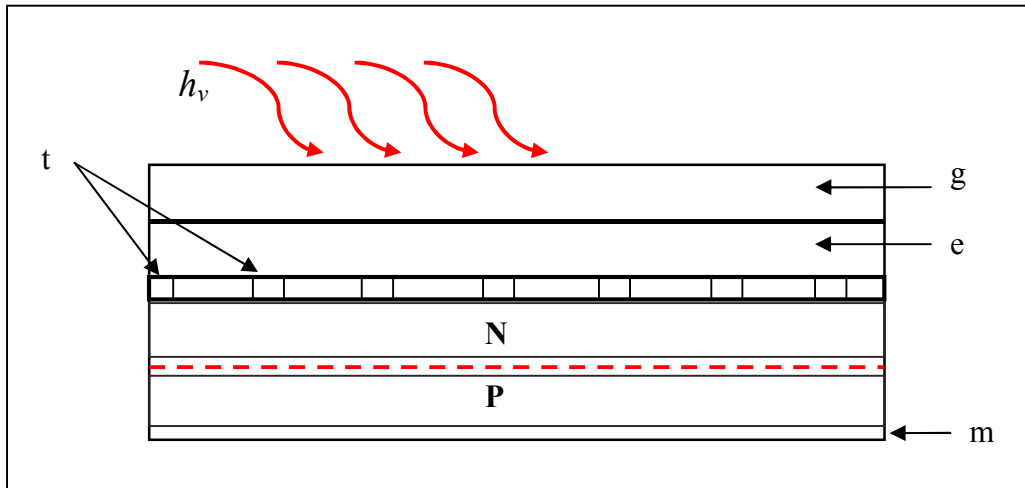
### I.3 La cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par E. Becquerel en 1839 .Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homo-jonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne.

Dans la figure (2) un échantillon schématique d'une configuration de la cellule solaire, elle se compose d'un abri du verre (g), un encapsulant (e), et un métal en arrière contact (m) afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident [5].

La jonction p-n de ces deux matériaux fonctionne comme une diode. Lorsque cette diode est exposée à des photons dont l'énergie ( $h\nu$ ) est supérieure à celle de l'énergie du matériau, appelée l'énergie de bande de gap ( $E_g$ ), le nombre d'électrons libres du semi-conducteur de type-p et celui de trous du semi-conducteur de type-n augmente considérablement. Si les photons incidents ont une énergie inférieure à  $E_g$ , ils ne seront pas absorbés c'est-à-dire leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque.



**Figure I.2 :** présentation schématique d'une cellule solaire.

Dans une cellule PV, une large fraction de ces électrons et trous atteignent la jonction pn, et un champ électrique est créé. En conséquence, un courant électrique peut être établi en connectant les matériaux de type-n et type-p à un circuit extérieur. La direction de ce courant est l'opposé de celle de la cellule lorsqu'elle fonctionne en tant que diode, autrement dit, quand la diode est illuminée, un courant positif  $I$  traverse de n vers p.

La puissance électrique produite par une cellule industrialisée est très faible typiquement de 1 à 3W avec une tension de moins d'un volt [4].

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.

Le schéma d'une cellule solaire peut se présenter sous diverses variantes. La configuration la plus usuelle est la suivante [1].

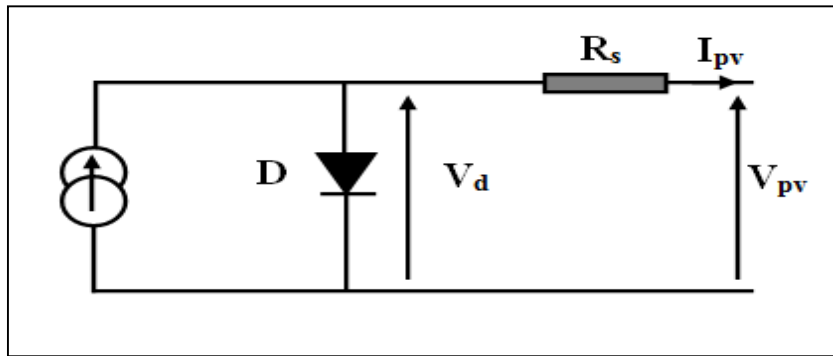


Figure I.3: schéma équivalent d'une cellule solaire.

### I.3.1 Les différents types de cellule photovoltaïque

De nos jours, il existe plusieurs types de cellule ayant des caractéristiques divers et variées, appropriée a une fonction ciblée. Nous allons donc cité différentes technologie de fabrication de ces cellules [2].

#### ➤ 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 [1].

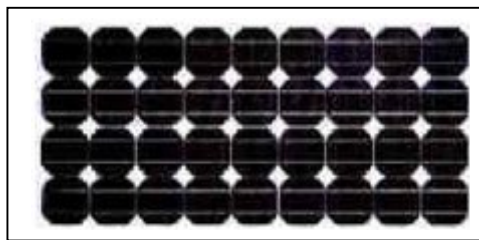


Figure I.4 : Cellules photovoltaïques monocristallines.

#### ➤ Avantage :

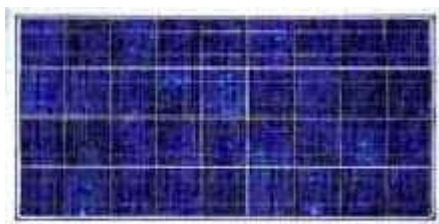
- ✓ très bon rendement.

#### ➤ Inconvénients :

- ✓ Coût élevé, Rendement faible sous un faible éclairement.

➤ **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 [5].



**Figure I.5 :** Cellules photovoltaïques poly cristallines.

➤ **Avantage :**

- ✓ Bon rendement 13%, mais cependant moins bon que le monocristallin.
- ✓ Moins cher que le monocristallin
- ✓ Meilleur rapport qualité/prix.

➤ **Inconvénient :**

- ✓ Rendement faible sous un faible éclairage

➤ **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.



**Figure I.6 :** Cellules photovoltaïques amorphe.

➤ **Avantage :**

- ✓ Fonctionnent avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).
- ✓ Moins chères que les autres.

➤ **Inconvénients :**

- ✓ Rendement faible en plein soleil (environ 6%).
- ✓ Performances qui diminuent sensiblement avec le temps.

➤ **Les cellules en couches minces [6] :**

La technologie à couche mince désigne un type de cellule obtenu par diffusion d'une couche mince de silicium amorphe sur un substrat de verre. Dans cette technologie, le principe est d'appliquer le semi-conducteur sous forme de "spray" sur un support. Le semi-conducteur est ainsi économisé car il n'est pas, comme pour les cellules au silicium cristallin, scié dans la masse. Cette méthode de fabrication devrait permettre dans l'avenir de réduire significativement les coûts de production des cellules PV.

➤ **Les cellules en polymère :**

Au-delà de l'amélioration des performances en termes de rendement et de fiabilité des dispositifs photovoltaïques, le véritable enjeu est de réduire de façon significative le coût du kilowattheure produit. Les matériaux organiques plastiques ou polymères, faciles à mettre en œuvre, sont en passe de s'imposer à côté du silicium pour la fabrication des cellules solaires, même si des verrous technologiques restent à lever.

Si le marché des cellules photovoltaïques est aujourd'hui dominé à plus de 90% par le silicium cristallin, les composites organiques, encore au stade de l'étude de la faisabilité



d'introduction sur le marché en termes de rendement et de fiabilité, sont appelés à s'imposer là où les technologies du silicium sont ou seront mal positionnées.

Les organiques, autrement dit les plastiques, moins onéreux, apparaît en effet de plus en plus comme une voie d'avenir complémentaire, séduisante et crédible. Dégradables, les polymères garantissent une technologie propre dans un contexte de développement durable, faciles à manipuler. Leur choix comme matériau de base permettrait aux industriels de n'avoir recours pour l'ensemble de l'ingénierie de la cellule qu'à une seule et même technologie peu coûteuse, car proche des techniques éprouvées de l'imprimerie. Autre avantage: ces plastiques permettraient également d'étendre l'offre à des produits souples ou de conformations diverses (tuiles de bâtiments par exemple), donnant accès à des marchés inaccessibles aux technologies classiques, notamment par leur intégration à des systèmes multifonctionnels.

➤ **Les cellules à multi-jonction :**

Le plus souvent ces cellules sont développées à partir de matériaux autres que le silicium. L'avantage de ces cellules est la quantité de lumière théoriquement absorbable par celle-ci. En effet, chaque matériau possède une réflectivité (quantité de lumière réfléchie) variable suivant la longueur d'onde de la lumière reçue. Comme la lumière blanche issue du soleil contient toutes les longueurs d'ondes possibles, l'utilisation de différents matériaux permet d'augmenter les rendements car chacun d'eux va capter et transformer en énergie électrique l'énergie lumineuse issue d'une partie différente du spectre.

➤ **Module à l'arséniure de gallium (GaAs) :**

Les modules GaAs sont les photos générateurs de l'espace avec des rendements supérieurs à 25%, voir plus avec l'ajout de concentrateur de lumière. Leur défaut est le coût très élevé qui limite leur utilisation aux domaines où les performances sont plus importantes que le prix.

➤ **Le diséluniure de cuivre et d'indium + sulfure de cadmium (CIS) :**

La couche équipant le panneau solaire est de l'ordre du micromètre. De plus l'absence de silicium permet de limiter les coûts. Malgré des rendements inférieurs aux cellules à base de silicium poly cristallin, les dernières avancées technologiques réduisent l'écart. Enfin, elle peut être installée sur des matériaux flexibles.

➤ **Le dioxyde de titane ou rutile (TiO<sub>2</sub>) :**

Ces cellules sont également appelées cellules de Graetzel (nom de l'inventeur de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse). Ce sont des cellules solaires nanocristallines à colorant. Leur fonctionnement est inspiré de la photosynthèse. Elles sont constituées d'un côté d'une couche de dioxyde de titane recouverte d'un colorant appelé « sensibilisateur » et de l'autre d'une solution électrolytique. Lorsqu'un rayon lumineux tombe sur le colorant, un électron est éjecté. Tous les électrons ainsi libérés traversent l'oxyde, sont collectés au bord de la cellule et ensuite dirigés vers un circuit externe.

➤ **Les cellules à concentration :**

Ces cellules sont constituées de deux éléments : une cellule solaire et un concentrateur. La cellule solaire peut être de n'importe quel type. Son rôle est bien entendu de produire de l'énergie. Le rôle du concentrateur est de capter des rayons du soleil sur une surface supérieure à la surface de la cellule. Ainsi, l'énergie reçue est plus importante, donc la production est plus importante. Les records de rendement sont battus grâce à ce type de cellules : on atteint 40.7% en laboratoire avec une concentration de 296. Des fabricant commencent à vendre des solutions comprenant de petits concentrateurs. Cette solution a un défaut principal : la chaleur. En effet, l'augmentation de la température diminue le rendement des panneaux. Aussi les cellules doivent être refroidies soit activement soit passivement.

### I.3.2 Caractéristique électrique d'une cellule solaire photovoltaïque [2]

➤ **Caractéristique courant-tension :**

La figure ci-dessous représente la courbe  $i = f(v)$  d'une cellule photovoltaïque Typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température

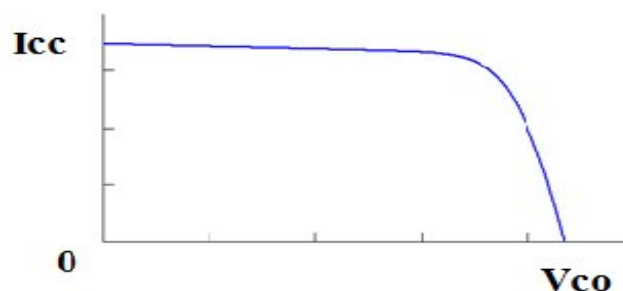
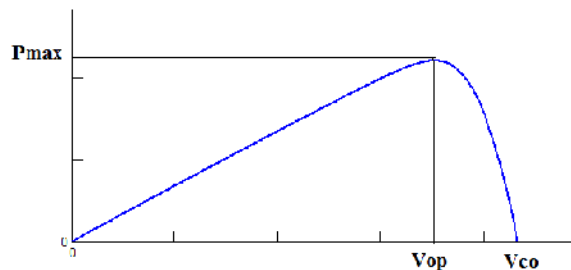


Figure I.7 : Caractéristique  $I=F(V)$  d'une cellule solaire.

➤ **Caractéristique puissance-tension :**

Dans les mêmes conditions que les précédents on présente la caractéristique  $P = f(v)$  d'une cellule photovoltaïque Typique.

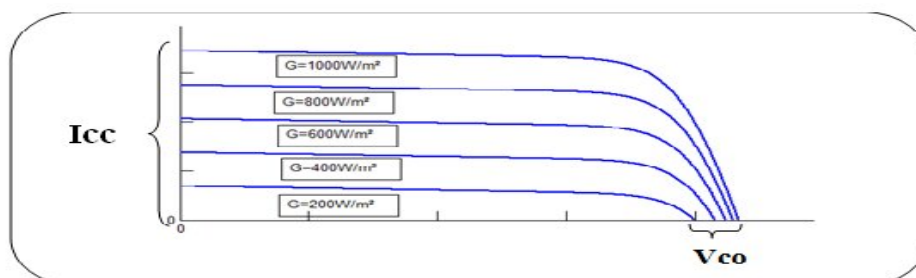


**Figure I. 8 :** Caractéristique  $P=F(V)$  d'une cellule solaire.

Le fonctionnement d'une cellule solaire est très influencé par de nombreux paramètres parmi eux l'ensoleillement et la température.

### I.3.2.1 Influence de l'éclairement [2]:

La *figure I.9* présente un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement :

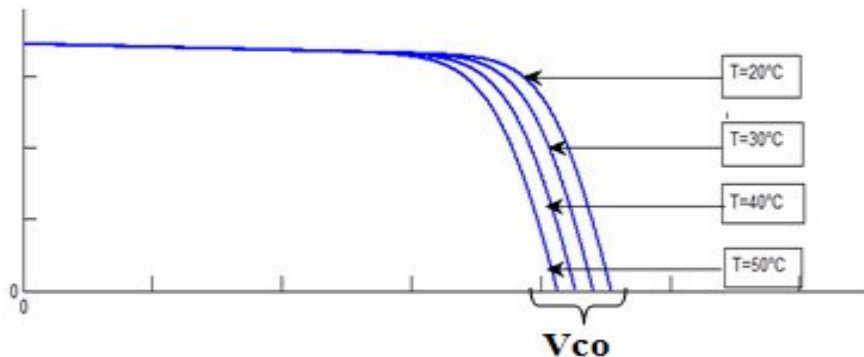


**Figure I.9 :** Caractéristique d'une cellule photovoltaïque pour différents éclairements.

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

### I.3.2.2 Influence de la température [2] :

La *figure I.10* présente des courbes courant-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule photovoltaïque



**Figure I.10 :** Caractéristique d'une cellule photovoltaïque pour différents température.

On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au dessus de 25 °C.

## I.4 Le générateur photovoltaïque et ses performances

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle afin d'obtenir des Caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert [6].

### I.4.1 Association de cellules photovoltaïques en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série (indice s) est obtenue par addition des tensions à courant donné. La figure I.11 montre la caractéristique résultante ( $I_{cc}, V_{co}$ ) obtenue en associant en série  $n_s$  cellules identiques .

$$V_{co}(\text{module}) = n_s * V_{co}(\text{cellule})$$

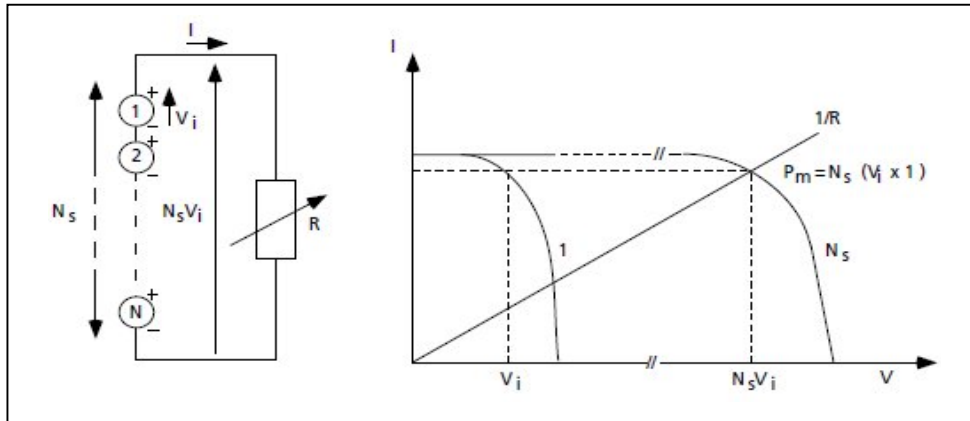


Figure I.11: Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques.

**I.4.2 : Association de cellules photovoltaïques en parallèle :**

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée [2].

La figure I.12 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèle (indice p) np cellules identiques.

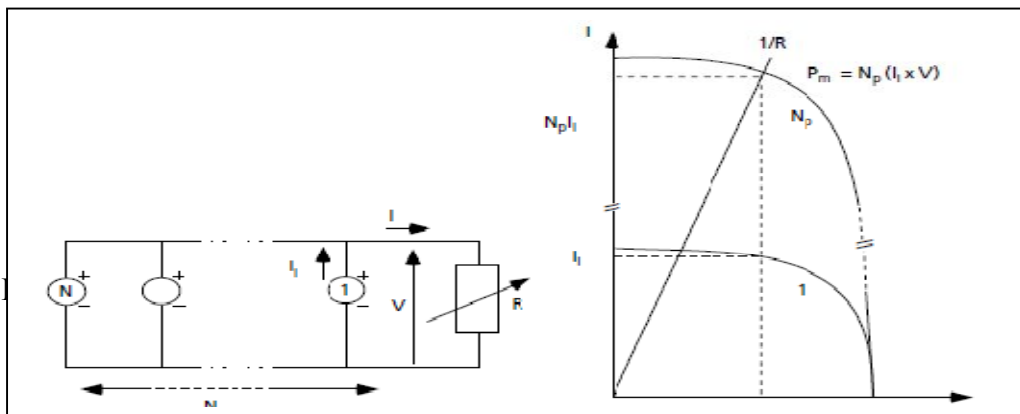


Figure I.12 : Caractéristique résultante d'un groupement constitué de Np cellules identiques en parallèle.

**I.5 Les systèmes photovoltaïques**

Parmi les différents couplages existant nous représentons deux systèmes classé selon leurs connexions : les systèmes autonomes et les systèmes connecté au réseau [5].

**I.5.1 Les systèmes photovoltaïques autonomes :**

Ces système photovoltaïques sont installes pour assurer un fonctionnement autonome sans recours a d'autres sources d'énergie généralement, ces système sont utilisés dans des régions isolées et éloignées du réseau .selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique.

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont classes comme suit [5] :

**a. Systèmes autonomes sans stockage électrochimique :**

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour son démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairage le plus faible.

Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de systèmes autonomes où le stockage de l'eau dans un réservoir est généralement le plus adopté par rapport au stockage électrochimique [6].

La pompe solaire est branchée directement sur le générateur photovoltaïque par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC ou DC/AC selon que nous utilisons respectivement, un moteur à courant continu ou un moteur à courant alternatif. Le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est donc variable et fonction du rayonnement solaire [5].

**b. systèmes autonomes avec stockage électrochimique :**

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïques au cours de la journée. Donc, le stockage électrochimique dans la batterie est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques [7].

### I.5.2 Systèmes photovoltaïques connectée au réseau :

Les générateur photovoltaïques connectée au réseau est l'application la plus envisagée en zone urbaine avec l'installation de modèles sur les toits et les façades de bâtiments [6].

L'intégration d'élément photovoltaïque dans les structures des bâtiments a nombres atouts En étant connectes au réseau, ces système permettent de s'affranchirai des problèmes de stockage et de transport de l'électricité. L'excès de production, âpres transformation en alternatif a l'aide d'un onduleur, est injecte dans le réseau .en période de non production (la nuit), électricité est prélevée sur le réseau. Le compteur tourne alors dans les deux sens.

Ainsi, les écrans pare-soleil, les marquises, les soupiraux, les façades, etc. sont mis a contribution dans la fourniture d'électricité et en plus est sous des formes souvent plus esthétique que l'élément conventionnels.

### I.5.3 les systèmes de pompage photovoltaïque :

Généralement, les systèmes de pompage photovoltaïque est constitue d'un générateur photovoltaïque, un sous-système de pompage et un réservoir d'eau (Figure I.13).les système de pompage photovoltaïque fonctionne au fil du soleil. Le stockage de l'eau dans les réservoirs est la solution adoptée par apport au stockage électrochimique dans les batteries. Le pompage de l'eau a l'aide de l'énergie photovoltaïque est utilise pour l'alimentation en eau potable et pour la petit irrigation [8].

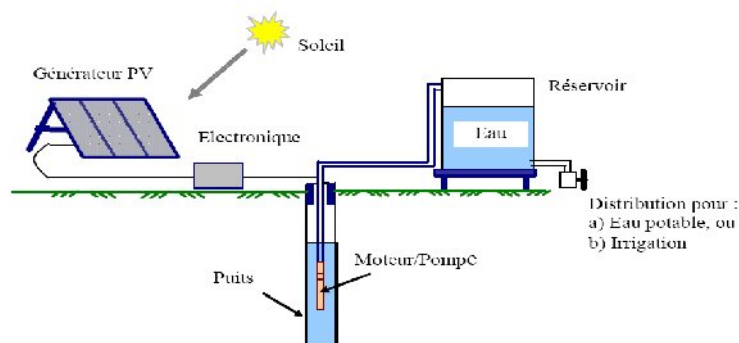


Figure I.13 : Configuration générale d'un système de pompage photovoltaïque.

### I.5.3.1 Les différents types de pompage photovoltaïque [7] :

Sous le terme générale pompage, différentes applications sont regroupées les différences entre les type de pompage photovoltaïque résident dans la source d'où provient l'eau (rivière, puits, forage...) et dans le mode de fonctionnement de l'installation (sur batteries ou au fil du soleil).ces deux derniers ce distingue par leur application :

### I.5.3.2 Le pompage au fil du soleil :

Pour éviter un coût supplémentaire de l'installation, la plus part des systèmes de Pompage photovoltaïque fonctionnent au ' fil du soleil 'où le moteur d'entraînement est Directement couplé au générateur sans stockage d'énergie (la puissance électrique fournie au Récepteur est fonction de la puissance d'éclairement). Cet arrangement est bien adapté aux charges non critiques telles que les pompes, qui ne nécessitent pas une opération continue durant toute la journée, aussi, les horaires de cette production ne sont pas compatibles avec les horaires de la majorité des activités agricoles. (Elles commencent généralement à débiter vers 8h et fonctionnent à leur maximum de 11h à 13h et s'arrêtent vers 17h, soit environ 8 heures de fonctionnement par jour) [14].

Le pompage au fil du soleil n'est pas adapté aux régimes particuliers (applications domestiques à débit faible, applications particulières avec une hauteur manométrique totale (HMT) élevée,...). En revanche, le système au fil du soleil fonctionne parfaitement pour le pompage de l'eau qui est alors directement stockée dans un réservoir [7].

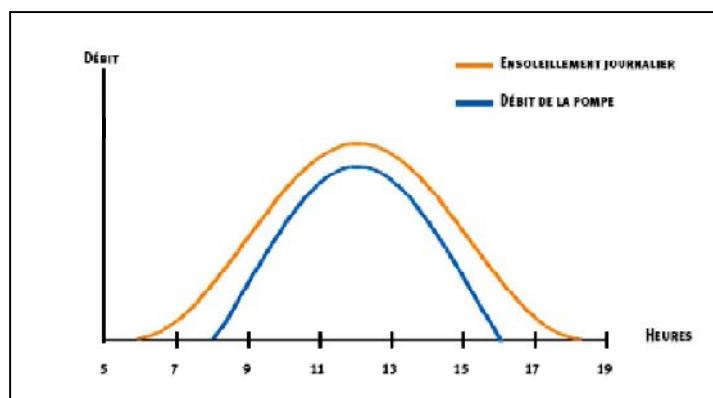


Figure I.14: Caractéristique du pompage avec batteries.



**a. Le pompage avec stockage hydraulique :**

L'eau en excès peut être pompée dans des réservoirs de stockage ou des étangs situés en hauteur afin de garantir la disponibilité d'eau par voie gravitaire en cas de couvert nuageux.

**b. Le pompage avec stockage électrochimique (batteries) :**

Très souvent, le pompage photovoltaïque ne correspond pas aux heures d'ensoleillement où nécessite une intensité régulière, ce qui implique un stockage. Cependant, le stockage en photovoltaïque apparaît actuellement comme le maillon faible et le plus coûteux. Lorsqu'un stockage de l'eau n'est pas possible, l'installation de pompage photovoltaïque peut fonctionner sur batteries où le générateur photovoltaïque nécessite un stockage d'énergie sur batteries d'accumulateurs [5].

**b.1 Système de stockage électrochimique :**

Parmi les solutions disponibles, le stockage électro-chimique par batterie d'accumulateurs offre une bonne réversibilité entre la décharge et la recharge, L'intérêt des accumulateurs électrochimiques est la disponibilité d'une tension quasi-constante qui fixe le point de fonctionnement sur une droite verticale qui peut être aussi proche que possible de la droite qui définit la charge optimale d'un générateur photovoltaïque.

**b.1.2 Principe de fonctionnement d'une batterie [23] :**

Deux électrodes, l'une positive et l'autre négative, sont séparées par électrolyte. Aux deux interfaces électrode-électrolyte interviennent des réactions chimiques.

A l'anode (électrode négative en décharge) s'opère une réaction d'oxydation selon la formule suivante [23]:



$M_1$  : étant l'espèce active de l'anode.

Les électrons libérés transitent dans le circuit extérieur pour atteindre la cathode (électrode positive en décharge) où s'opère une réaction de réduction selon la formule suivante :



$M_2$  : étant l'espèce active de la cathode.

L'électrolyte assure le transport des espèces ioniques mises en jeu dans la réaction globale d'oxydoréduction, qui s'écrit :



### b.1.3 Caractéristique d'une batterie :

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

- 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 [24].
- 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: les durées de vie exprimées en années sont données pour un fonctionnement en floating à 25 °C.
- Autonomie : Dans le cas du Pb, 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

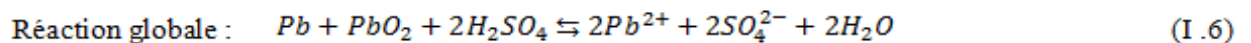
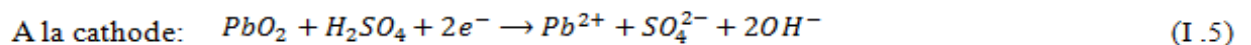
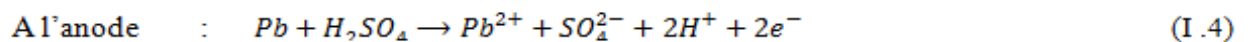
gélifié et des bouchons catalysant la réaction de recombinaison des gaz dans les accumulateurs étanches dits sans entretien [24].

## b.2 Les divers types de batteries [24]:

### b.2.1 Les batteries au plomb ou plomb-acide :

Les batteries au plomb acide sont la forme de stockage de l'énergie électrique la plus courante, en raison de leur coût qui est relativement faible et d'une large disponibilité.

Leur fonctionnement est basé sur la réaction d'oxydoréduction suivante :



Lors de sa réduction en  $\text{Pb}^{2+}$  (équation I.5). Les protons produits à l'anode et les ions hydroxydes à la cathode se recombinaient en  $\text{H}_2\text{O}$  (équation I.6)

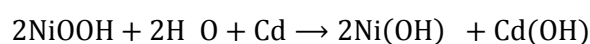
Les décharges trop profondes peuvent conduire à une perte irréversible de capacité. Trois causes possibles sont à l'origine de ce phénomène :

- Transformation irréversible d'une partie de la matière active de l'électrode positive en cristaux de sulfate de plomb.
- Gonflement progressif et perte de cohésion de la matière active de l'électrode positive.

Afin d'obtenir la tension désirée aux bornes d'un élément, on connecte plusieurs cellules en série à l'intérieur du module ; par contre, si l'on désire augmenter la capacité et le courant, il faut connecter ces cellules en parallèle.

### b.2.2 Les batteries au nickel-cadmium :

Les batteries de nickel- Cadmium ont une structure physique semblable à celles du plomb- Acide. Au lieu du Plomb, elles utilisent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives. L'électrolyte est de l'hydroxyde de Potassium, d'où le nom d'accumulateur alcalin. Sa tension varie de 1.15 à 1.45 V par élément avec une valeur nominale à 1.2 V [25]. La réaction d'oxydoréduction suivante décrit le fonctionnement du nickel-cadmium :



L'utilisation de cadmium qui fait partie de la famille des métaux lourds présente un problème sérieux à cause des risques environnementaux (problème de recyclage de cadmium), mais ils offrent des performances supérieures au plomb en termes de capacité et durée de vie (de 15 à 20 ans). Ils demandent cependant une alimentation de charge très propre et leurs prix sont nettement plus élevés que les batteries au plomb (environ 1.5 fois).

Densité d'énergie  $\sim 60 \text{ Wh/kg}$  ; densité de puissance  $\sim 0.5 \text{ à } 1 \text{ W/kg}$  .

### **b.2.3 Les batteries au nickel-zinc :**

L'électrode positive est encore de l'oxyde de nickel mais l'électrode négative est cette fois composée de zinc métal. Outre une meilleure qualité environnementale (pas de métaux lourds), ce type de batteries présente une densité d'énergie élevée (25% supérieure aux accumulateurs nickel-cadmium).

Cependant, actuellement la durée de vie reste trop limitée du fait l'apparition de dendrites de zinc sur l'électrode négative pendant la charge.

### **b.2.4 Les batteries sodium chlorure de nickel :**

Elles sont également connues sous le nom de batteries Zébra du nom d'une marque. Le séparateur entre les électrodes est une céramique, conducteur ionique. Elles fonctionnent à une température de l'ordre de  $300^\circ\text{C}$ . Les densités d'énergie étant relativement élevées et le fonctionnement fiable, Densité d'énergie  $\sim 120 \text{ Wh/kg}$  ; densité de puissance  $\sim 200 \text{ W/kg}$  .

La haute température est requise pour assurer la conductivité de l'électrolyte solide. La durée de vie toujours en teste, elle est évalué à plus de 700 cycles, de plus le fonctionnement ne nécessite aucune maintenance, par contre l'électrolyte solide est fragile et difficile à produire [25].

### **b.2.5 Les batteries lithium-ion :**

Elles fonctionnent selon une réaction réversible d'intercalation : des atomes de lithium s'intercalent entre les feuillets de la structure lamellaire de l'anode pendant la charge et se désintercalent pendant la décharge.

Ces accumulateurs font partie des nouveaux types diffusés depuis 10 ans et fort prometteurs. Leurs énergies et puissance massique sont très élevées par comparaison au plomb-acide, respectivement  $\sim 150 \text{ Wh/kg}$  et  $\sim 300 \text{ W/kg}$  .

Le lithium est en effet le plus léger des métaux et possède un potentiel électrochimique élevé, ce qui en fait le métal le plus attractif pour constituer l'électrode négative d'un accumulateur.

### **b.2.6 Les batteries lithium-ion polymères :**

La différence majeure est l'électrolyte qui est cette fois solide et composé de polymères qui assurent la circulation des ions lithium entre les deux électrodes. L'avantage de cette architecture est lié à l'absence de liquide dans la batterie afin d'augmenter la densité d'énergie ainsi que la sécurité et la durée de vie.

Densité d'énergie  $\sim 170 \text{ Wh/kg}$  ; densité de puissance  $\sim 600 \text{ W/kg}$  .

### **b.2.7 Les batteries métal-hydrures métallique :**

L'oxyde de nickel est toujours utilisé comme matériau d'électrode positive. Par contre au niveau de l'autre électrode, c'est l'hydrogène stocké dans des hydrures métalliques qui est l'espèce active. L'électrolyte est un hydroxyde de potassium qui doit absorber et transporter les ions  $\text{OH}^-$  .

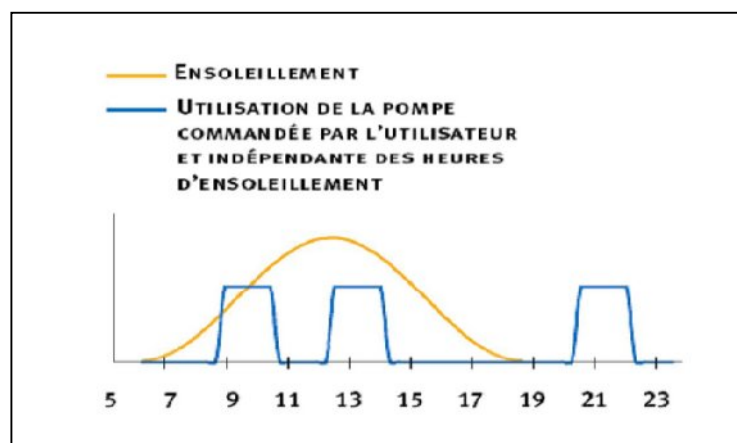
La densité d'énergie est élevée  $\sim 100 \text{ Wh/kg}$  ; densité de puissance  $\sim 1000 \text{ W/kg}$  . Elles supportent des courants de charge fort (charge rapide) à condition d'être refroidies.

L'un des principaux défauts est leurs tendances à l'autodécharge consécutivement à la diffusion d'hydrogène à travers l'électrolyte.

Le tableau (I.1) donne quelques chiffres typiques de caractéristiques des différents types de batteries [24] :

Batterie-couple	Plomb-acide	Ni-Cd	Ni-Zn	Li-ion	Li-polymère
Energie-poids (Wh/kg)	40	60	90	120	150 à 200
Tension d'une cellule (V)	2	1.2	1.5	3.7	3.7
Tension en fin de décharge lente/rapide (V)	1.8 à 1.65	1.09 à 0.7		2.75 à 1.45	
Nombre de cycle	600 à 1000	800 à 2500	600 à 1000	1000	100
Température de fonctionnement(°C)	0 à 45	0 à 50		ambiante	ambiante
Temps de charge (h)	5 à 20	10 à 15		1 à 2	1 à 5
Rendement (%)	65 à 85	70 à 80		85 à 95	90 à 95

**Tableau (I.1) :** Caractéristiques des différents types de batteries [24].



**Figure I.15:** Caractéristique du pompage avec batteries [5]

### I.5.3.3 Les différents composants d'un système de pompage photovoltaïque:

De point de vue conception, le système de pompage illustré dans le schéma ci-dessus est généralement constitué de :

- Générateur, constitué de modules photovoltaïques; eux-mêmes constitués de cellules.
- Un groupe électro- pompe, qui se décompose en deux parties : le moteur et une pompe généralement centrifuge multicellulaire.
- Une tuyauterie amont et aval.

#### I.5.3.3 .1 Sous système de pompage :

Le sous-système de pompage est composé d'un groupe moteur-pompe et un conditionneur d'énergie [6].

#### I.5.3.2 .2 Groupe moteur-pompe

##### a. Pompe :

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. Outre ces deux classifications que nous décrirons plus loin, 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 celles-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 [5,7].

### a.1. Pompes centrifuges :

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 faible ensoleillement. 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 solaires, fournissant un bon rendement global [7].

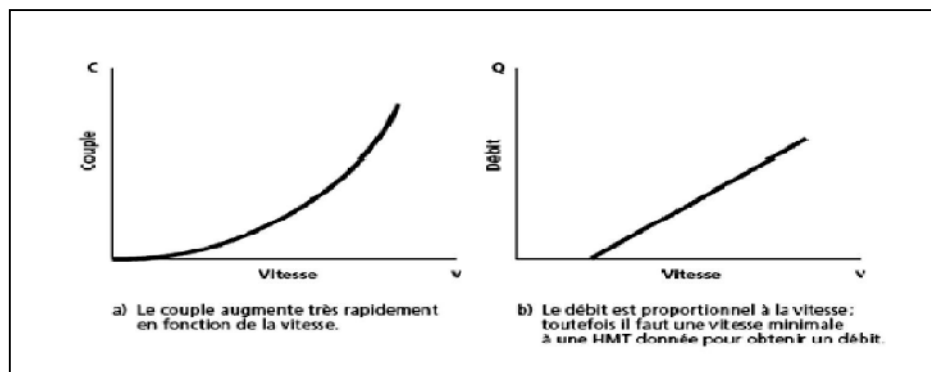


Figure I.16 : Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge [5].

### a. 2. Pompes volumétriques :

Dans ces pompes, le fluide est mis en mouvement par une variation du volume qui le contient. Les pompes volumétriques sont de deux sortes, les pompes volumétriques alternatives (exemple : pompe à piston, à membranes, etc.) et les pompes volumétriques rotatives (pompe à vis, etc.).

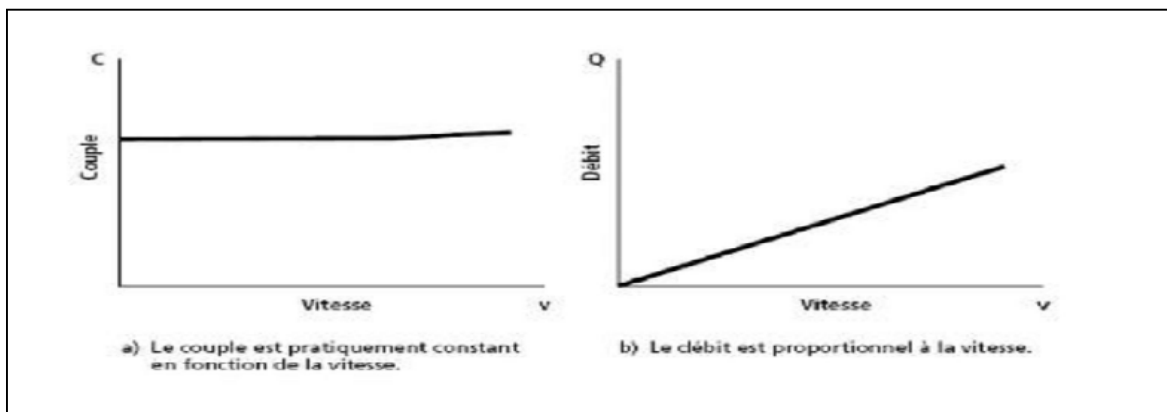
Leurs principaux atouts sont les suivants :

- Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à  $5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) et aux grandes hauteurs.
- Elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont auto-amorçages.



Le couple de démarrage d'une pompe volumétrique (de 3 à 5 fois le couple nominal) et la caractéristique  $I = f(V)$  de ce type de pompe font que son fonctionnement en direct sur un Panneau photovoltaïque n'est pas économiquement fiable.

Pour palier au problème de surdimensionnement du générateur résultant de cette inadaptation, un adaptateur d'impédance est utilisé pour permettre un rendement aussi élevé que possible de L'ensemble du système [10].



**Figure I. 17:** Caractéristiques d'une pompe volumétrique [6].

### **b. Moteurs :**

Le moteur d'un groupe motopompe convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. Dans ce dernier cas, un convertisseur électronique ou un onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant d'un générateur photovoltaïque en courant alternatif. Pour cette raison, le choix d'un moteur à courant continu peut sembler, de prime abord, plus intéressant, mais nous allons voir que l'évolution des convertisseurs électroniques efficaces permet également de choisir des moteurs alternatifs efficaces et surtout, moins cher.

#### **b. 1 . Moteur à courant continu:**

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).

Les moteurs à courant continu comportent un induit et un inducteur. Si l'induit est généralement constitué de bobinages en cuivre, l'inducteur peut être réalisé soit avec des bobinages en cuivre, soit avec des aimants permanents [8].

**b. 2. Moteur à courant alternatif:**

Pour les applications de faible et moyenne puissance (jusqu'à quelques kilowatts), le réseau monophasé standard suffit. Pour des applications de forte puissance, les moteurs alternatifs sont généralement alimentés par une source de courants polyphasés. Le système le plus fréquemment utilisé est alors le triphasé (phases décalées de  $120^\circ$ ) utilisé par les distributeurs d'électricité. Ces moteurs alternatifs se déclinent en trois types :

**b.2.1 Les moteurs universels:**

Un moteur universel est un moteur électrique fonctionnant sur le même principe qu'une machine à courant continu à excitation série : le rotor est connecté en série avec l'enroulement inducteur. Le couple de cette machine indépendant du sens de circulation du courant est proportionnel au carré de son intensité. Il peut donc être alimenté indifféremment en courant continu ou en courant alternatif, d'où son nom. Pour limiter les courants de Foucault qui apparaissent systématiquement dans toutes les zones métalliques massives soumises à des champs magnétiques alternatifs, son stator et son rotor sont feuilletés.

Dans la pratique, ces moteurs ont un mauvais rendement, mais un coût de fabrication très réduit. Leur couple est faible, mais leur vitesse de rotation est importante. Quand ils sont utilisés dans des dispositifs exigeant un couple important, ils sont associés à un réducteur mécanique.

**b.2.2 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.

### **b.2.3 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 [5].

### **I.5.3.4 les convertisseurs statiques :**

Les convertisseurs sont les appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative.

#### **a. Convertisseur DC/DC (hacheur) :**

Les convertisseurs continus ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. La tension continue de départ peut être un réseau alternatif redressé et filtré, une batterie d'accumulateurs, une alimentation stabilisée...

##### **a.1. Hacheur dévolteur (ou série) :**

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. Il comporte un interrupteur à amorçage et à blocage commandés (transistor bipolaire, transistor, MOS ou IGBT...) et un interrupteur à blocage et amorçage spontanés (diode).

**a.2. Hacheur survolteur (ou parallèle) :**

Dans ce hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée, d'où son nom. Cette structure demande un interrupteur commandé à l'amorçage et au blocage (Bipolaire, MOS, IGBT...) et une diode (amorçage et blocage spontanés).

**b. Convertisseur DC/AC (onduleur) :**

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

Il est très efficace pour des caractéristiques d'entrée et de sortie fixe. Son coût assez élevé et la nature variable de l'ensoleillement et du couple résistant des pompes en général ont longtemps exclu l'emploi des moteurs à courant alternatif pour le pompage solaire.

Les onduleurs de pompage sont en général à fréquence ( $f$ ) variable afin de permettre une variation de la vitesse de rotation de la pompe. Dans ce cas, le rapport de la tension alternative ( $U$ ) sur la fréquence ( $U/f$ ) est constant. La fréquence du courant alternatif est directement proportionnelle à l'intensité de l'ensoleillement.

Nous distinguons plusieurs types d'onduleurs suivant la qualité du signal de sortie :

- Onduleur à onde sinusoïdale modifiée, en marche d'escalier, générateur d'une onde proche de l'onde sinusoïdale.
- Onduleur à modulation de largeur d'impulsion MLI (pulse-width modulation).
- Onduleur à onde sinusoïdale.

L'onduleur à onde sinusoïdale modifiée peut supporter de fortes surcharges et sa distorsion harmonique est relativement faible, de sorte qu'il n'introduit que peu de pertes par effet Joule susceptibles de causer l'échauffement des moteurs. Il est souvent employé avec de petits systèmes de pompage.

L'onduleur à modification de largeur d'impulsion utilise des commutateurs électroniques rapides pour varier la largeur d'impulsion. En utilisant un filtre à la sortie, l'onde sinusoïdale peut être reconstruite. Ces onduleurs relativement peu coûteux sont très efficaces,

fonctionnant à près de 90%-95% de rendement. Ils sont employés par la plupart des systèmes de pompage à courant alternatif [6].

L'onduleur à onde sinusoïdale n'a pas la capacité de surcharge des précédents onduleurs et son coût est relativement élevé. Il est peu employé pour les systèmes de pompage.

Une deuxième fonction de l'onduleur est d'adapter le point de fonctionnement (Courant tension) au générateur.

Une troisième fonction de l'onduleur est la gestion et la protection de l'installation :

- Protection : surchauffe, surcharge, sous charge, surtension, sous-tension, défaut à la 0
- terre, court-circuit, fonctionnement à sec, blocage groupe motopompe, inversion de polarité, réservoir plein [8].
- Contrôle de mise en marche et indication de pannes par voyants lumineux.

La durée de vie moyenne des onduleurs de pompage est de sept ans. Ils ne nécessitent pas d'entretien particulier. Seule la qualité de l'étanchéité des presse-étoupe au passage des fils doit être contrôlée [6].

Le rendement de l'onduleur est généralement élevé pour valoriser au mieux l'énergie produite par le générateur. Il est de l'ordre de 95 % au point de fonctionnement nominal.

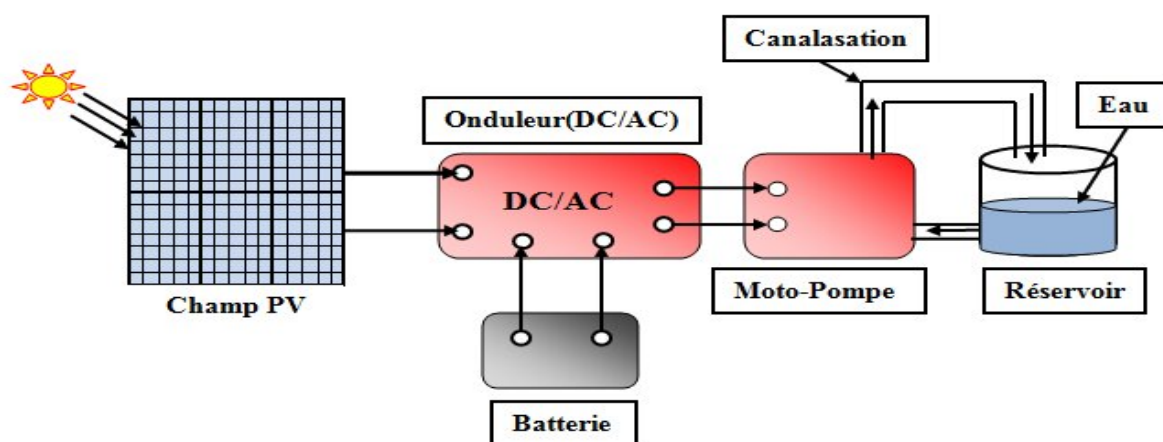
## **I.6 Objectif de mémoire :**

Dans ce présent travail nous allons dimensionner et installée un système de pompage photovoltaïque au laboratoire de recherche targa ouzmour université de bejaia. Notre objectif dans cette initiative est de faire une étude complète des différents éléments de cette installation à savoir :

- Nombre de panneaux photovoltaïque a installée.
- Dimensionnement du convertisseur.
- Identification du groupe moto pompe.

### I.6.1 : Descriptions de l'installation :

L'installation sera composé d'un groupe motopompe le moteur fonction avec un courant alternative qui est de type asynchrone de puissance utile  $P_u=370$  w qui va entériné la pompe le groupe sera reliev vers un réservoir de 500L et vers un convertisseur qui va assuré la conversion du courant continu émis par les panneaux photovoltaïques en courant alternative ,Elle sera aussi composé d'une ou plusieurs batterie qui assure l'autonome en cas d'une journée non ensoleiller et un régulateur de charge qui lui assure la charge et la décharge et bien sur la protection.



**Figure I. 18** Schéma explicatif de l'installation du pompage photovoltaïque.

## I.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a évoqué l'intérêt des énergies renouvelables dans la vie économique et environnementale en particulier l'énergie solaire et son domaine d'utilisation dont l'énergie solaire photovoltaïque est d'une importance capitale.

Ensuit on a décrit les systèmes photovoltaïques et leur intérêt dans la notre vie Ainsi que l'importance de cette énergie solaire dans l'application du pompage photovoltaïque.

Dans le prochain chapitre on va donner les équations de fonctionnement de générateur photovoltaïque ainsi que leur simulation.

# *Chapitre II*

## *Modélisation du générateur photovoltaïques*

## II. Introduction :

Après avoir défini les différents composants du système photovoltaïque, nous présenterons les divers modèles du générateur photovoltaïque.

Pour trouver le modèle du générateur photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résultent de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

### II.1 La cellule solaire :

La cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. La modélisation du comportement électrique du panneau photovoltaïque peut être étendue au générateur photovoltaïque selon sa configuration, nombre de modules en série et en parallèle [22].

#### II.1.1 Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

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

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule, il définit la quantité des paires électron-trou créée par le générateur photovoltaïque et qui traverse la jonction (NP) sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et trous ( $L_n$  et  $L_p$ ) respectivement [2].

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

Avec :

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit de la cellule

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

C'est la tension pour laquelle la diode à l'obscurité ( $I=0$ ) fournit un courant égal au courant de court-circuit  $I_{cc}$ . Elle est obtenue comme suite [1]:

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

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

Avec :

$I_s$  : Courant de saturation de la diode.

$V_{th}$  : Tension thermique.



A : Coefficient d'idéalité de la diode.

T<sub>j</sub> : Température de la jonction.

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

- **Température de jonction :**

La température de jonction T<sub>j</sub> de la cellule est donnée par la relation suivante [12] :

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

Avec :

Noct : La température nominale de fonctionnement de la cellule solaire.

T<sub>a</sub> : Température ambiante.

E<sub>s</sub> : L'ensoleillement qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface (w/m<sup>2</sup>).

- **Facteur de Forme :**

On appelle facteur de forme (FF), (connu en anglais par Fill Factor) le rapport de la puissance électrique maximale au produit I<sub>cc</sub>V<sub>co</sub>, il définit l'efficacité de la cellule solaire, il est donné par la relation suivante [12]:

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

V<sub>mpp</sub> : Tension de point de puissance maximale (V).

I<sub>mpp</sub> : Courant de point de puissance maximale (A).

Point de puissance maximale :

C'est le point (V<sub>mpp</sub>, I<sub>mpp</sub>) ou la puissance dissipée dans la charge est maximale tel que :

$$P_m = V_m \cdot I_m \quad (II.6)$$

- **Rendement de conversion :**

C'est le rapport de la puissance électrique maximale pouvant être extraite, à la puissance du rayonnement solaire incident sur la surface S de la cellule. il est donné par la relation suivante

[11] : 
$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (II.7)$$

P<sub>in</sub> : puissance du flux lumineux incident.

- **La puissance du flux lumineux incident :**

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

S : La surface effective des cellules.

$E_s$  : L'ensoleillement qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface ( $\text{w/m}^2$ ).

## II.2 Modélisation et simulation de la cellule photovoltaïque :

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant finals du générateur photovoltaïque. Parmi ces modèles on peut citer les suivants [21] :

### II.2.1 Cellule idéale [13] :

C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire, car il ne tient pas compte des pertes ohmiques et des courants parasites, il se compose d'une diode et d'une source de courant monté en parallèle comme le montre la figure (II.1).

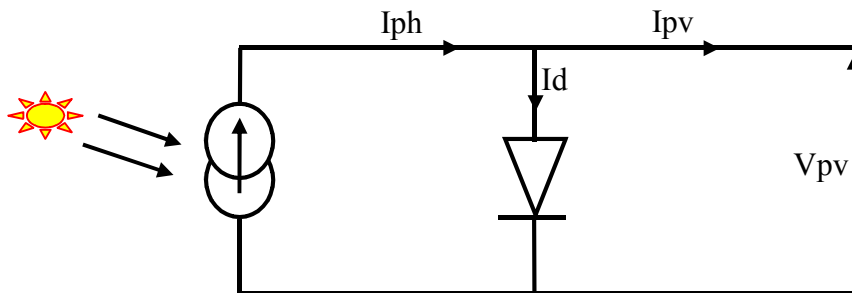


Figure (II-1): Modèle d'une cellule photovoltaïque idéale.

A travers la loi de Kirchhoff on a pu obtenir le courant généré par le générateur photovoltaïque :

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

Avec :

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

Donc :

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

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

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

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

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

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

$T_j$  : Température de jonction (K).

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

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

$A$  : Facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < A < 3$ ).

### II.2.2 Le modèle explicite [20]:

Ce modèle se caractérise par sa résolution très simple, car il nécessite seulement les données de quatre paramètres  $I_{cc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{mpp}$  et  $V_{mpp}$ . La relation entre le courant  $I_{pv}$  la tension  $V_{pv}$  est donnée par la relation suivante :

$$I_{pv} = I_{cc} \cdot \left[ 1 - C_1 \cdot \left( e^{\left( \frac{n_s \cdot V_{pv}}{C_2 \cdot V_{oc}} \right)} - 1 \right) \right] + \Delta I \quad (\text{II.12})$$

Où  $C_1$  et  $C_2$  sont des paramètres qui peuvent être calculés respectivement.

$$C_2 = \frac{V_{mpp} - 1}{\ln\left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_{cc}}\right)} \quad (\text{II.13})$$

$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_{mpp}}{I_{cc}} \right) \cdot e^{\left( \frac{n_s \cdot V_{oc}}{C_2 \cdot V_{oc}} \right)} \quad (\text{II.14})$$

$$\Delta I = \alpha_{cc} \cdot \left( \frac{E_s}{E_{sref}} \right) \cdot \Delta T + \left( \frac{E_s}{E_{sref}} - 1 \right) \cdot I_{cc} \quad (\text{II.15})$$

$$\Delta V = \beta_{ref} \cdot \Delta T + R_s \cdot \Delta I \quad (\text{II.16})$$

$$\Delta T = T_j - T_{jref} \quad (\text{II.17})$$

Les nouvelles valeurs de la tension et de courant photovoltaïque sont donnée par :

$$V_{pv,nouv} = V_{pv} + \Delta V_{pv} \quad (\text{II.18})$$

$$I_{pv,nouv} = I_{pv} + \Delta I_{pv} \quad (\text{II.19})$$

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

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

$I_{cc}$  : Courant en court circuit (A).

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

$\Delta I$  : Variation du courant (A).

$\Delta V$  : Variation de la tension (V).

$\Delta T$  : Variation de la température (°C).

$\alpha$  : Coefficient d'incrémentement du courant  $I_{cc}$ .

$\beta_{oc}$  : Coefficient d'incrémentement de la tension.

➤ **Détermination des paramètres  $C_i$  :**

On détermine les deux paramètres constants  $C_1$  et  $C_2$  du modèle précédent du générateur photovoltaïque grâce à la résolution numérique et l'utilisation des données du fabriquant.

Le tableau (II.1) montre les valeurs des paramètres  $C_i$  du modèle explicite :

paramètres	valeurs
	$8.98 \cdot 10^{-6}$
	0.086

**Tableau (II.1) :** Paramètres obtenus du modèle explicite [1].

### II.2.3 Modèle à deux diodes [13] :

Le schéma du générateur photovoltaïque d'un tel modèle est représenté sur la figure (II-2), qui se constitue d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes sont introduites pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN. La première diode décrit les propriétés de semi conducteur de la cellule et la seconde  $D_2$  symbolise le phénomène de recombinaison des porteurs de charge ainsi que deux résistances pour les pertes.

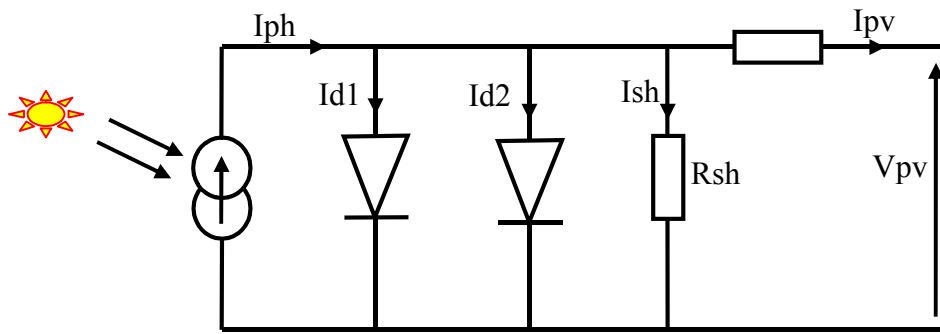


Figure (II-2) : Modèle d'une cellule photovoltaïque à deux diodes.

D'après Kirchhoff le courant délivré par le générateur photovoltaïque est donné par la relation suivante :

$$I_{pv} = (I_{ph}) - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{sh} \tag{II.20}$$

$$I_{d1} = I_{s1} \cdot \left[ e^{\left( \frac{q \cdot (V + R_s I)}{A \cdot n_s \cdot K \cdot T_j} \right) - 1} \right] \tag{II.21}$$

$$I_{d2} = I_{s2} \cdot \left[ e^{\left( \frac{q \cdot (V + R_s I)}{2 \cdot A \cdot n_s \cdot K \cdot T_j} \right) - 1} \right] \tag{II.22}$$

- $I_{s1}$  et  $I_{s2}$  sont les courants de saturation des diodes :

$$I_{s1} = P_4 \cdot T_j^3 \cdot e^{\left( \frac{-E_g}{K \cdot T_j} \right)} \tag{II.23}$$

$$I_{s2} = P_5 \cdot T_j^3 \cdot e^{\left( \frac{-E_g}{K \cdot T_j} \right)} \tag{II.23}$$

$$I_{ph} = P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2 \cdot (E_s - E_{sref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref})] \tag{II.25}$$

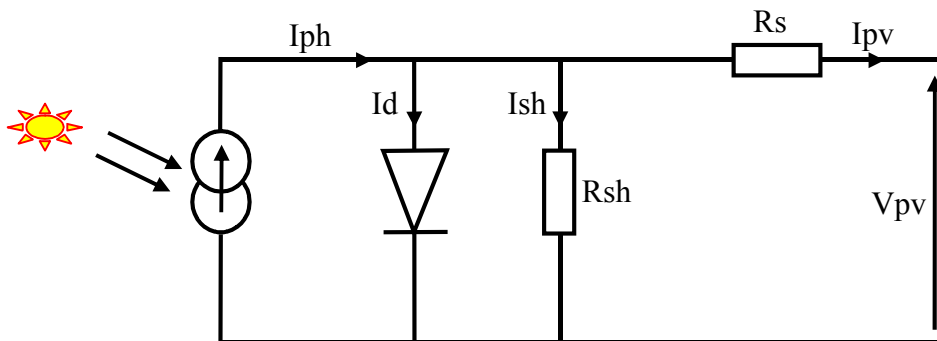
$$I_{pv} = P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2 \cdot (E_s - E_{sref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref})] - P_4 \cdot T_j^3 \cdot e^{\left( \frac{-E_g}{K \cdot T_j} \right)} \left[ e^{\left( \frac{q \cdot (V + R_s I)}{A \cdot n_s \cdot K \cdot T_j} \right) - 1} \right] - P_5 \cdot T_j^3 \cdot e^{\left( \frac{-E_g}{2 \cdot K \cdot T_j} \right)} \left[ e^{\left( \frac{q \cdot (V + R_s I)}{2 \cdot A \cdot n_s \cdot K \cdot T_j} \right) - 1} \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \tag{II.26}$$

P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	A	R <sub>S</sub>	R <sub>Sh</sub>
2.9.10 <sup>-3</sup>	0	0.14.10 <sup>-5</sup>	380	68	1	0.46	144

**Tableau (II.2) :** Paramètres obtenus du modèle à deux diodes du panneau

**II.2.4 Le modèle à une diode [12] :**

C'est le modèle le plus utilisé, le module photovoltaïque représenté à la (fig. II.3) se compose d'un générateur de courant qui représente la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, ce générateur est en parallèle avec une diode qui caractérise la jonction PN, deux résistances une résistance shunt Rsh et une résistance série Rs qui représentent les pertes.



**Figure (II-3) :** Modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode.

A partir de la figure (II.3) la loi de Kirchhoff nous a permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{II.27}$$

- $I_{pv}$  : Le courant délivré par le module (A).
- $I_{ph}$  : Le photo courant (A).
- $I_d$  : Le courant de diode (A).
- $I_{sh}$  : Le courant shunt (A).

$$I_{ph} = P_1 \cdot E_s \left( 1 + P_2 \cdot (E_s - E_{sref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref}) \right) \tag{II.28}$$

- $E_{sref}, T_{jref}$  : représentent l'éclairement et la température sous conditions STC.
- $P_i$  : paramètres constants.

La température de jonction  $T_j$  de la cellule est donnée par la relation suivante :

$$T_j = T_a + E_s \cdot \left( \frac{Noct-20}{800} \right) \tag{II.29}$$

Avec :

- NOCT: la température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal operating cell temperature).
- $T_a$  : la température ambiante.
  - Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_s \cdot \left[ e^{\left( \frac{q \cdot (V + R_s I)}{A \cdot n_s \cdot K \cdot T_j} \right)} \right] \quad (\text{II.30})$$

Avec:

$$I_s = P_4 \cdot T_j^3 \cdot e^{\left( \frac{-E_g}{K \cdot T_j} \right)} \quad (\text{II.31})$$

Avec :

- $I_s$  : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité (A).
- $n_s$  : nombre de cellules connectées en série.
- $E_g$  : L'énergie de gap (paramètre caractéristique du matériau, pour le silicium).
- $P_4$  : paramètre constant.

➤ Le courant de la résistance shunt est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.32})$$

Tel que :

- $R_s$  : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contact).
- $R_{sh}$  : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

D'où l'expression de la caractéristique courant-tension (I-V) qui est donnée par l'équation suivante :

$$I_{pv} = P_1 \cdot E_s \cdot \left( 1 + P_2 \cdot (E_s - E_{sref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref}) \right) - P_4 \cdot T_j^3 \cdot e^{\left( \frac{-E_g}{K \cdot T_j} \right)} \cdot \left[ e^{\left( \frac{q \cdot (V + R_s I)}{A \cdot n_s \cdot K \cdot T_j} \right)} - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.33})$$

➤ **Détermination des paramètres du modèle [1] :**

Les paramètres constants  $P_i$ , le facteur d'idéalité  $A$  et les résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$  du modèle du générateur PV sont obtenus par une résolution numérique (moindres carrés) sous Matlab-Simulink :

P1	P2	P3	P4	A	R <sub>S</sub>	R <sub>Sh</sub>
0.00500	0.0000727	-0.0000136	38.8	1	0.46	601

**Tableau (II. 2) :** Paramètres obtenu du modèle à une diode

### II.2.5 Modèle simplifié du modèle à une diode [13] :

Le modèle à une diode est actuellement le plus utilisé, il offre un bon compromis entre simplicités et précision et pour ces raisons on la utilisé pour notre étude.

Le modèle que nous avons choisit est simplifier, il exige peu de paramètres à estimer ( $I_{cc}$ ,  $I_{mpp}$ ,  $V_{oc}$ ,  $V_{mpp}$ ,  $R_s$ ), qui tiennent compte de variation du courant et de la tension du panneau photovoltaïque en fonction des conditions climatiques.

➤ L'expression du courant est donné par :

$$I_{pv} = I_{CC} \cdot [1 - e^{(K_2 V_{pv}^m - 1)}] \quad (II.34)$$

Où les coefficients  $K_1$ ,  $K_2$  et  $m$  sont donnés par les formules suivantes :

$$K_1 = 0.001175$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{oc}^m} \quad (II.35)$$

$$K_4 = \ln \left[ \frac{1+K_1}{K_1} \right] \quad (II.36)$$

$$m = \frac{\ln \left[ \frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[ \frac{V_{mpp}}{V_{oc}} \right]} \quad (II.37)$$

$$K_3 = \ln \left[ \frac{I_{CC} \cdot (1+K_1) - I_m}{K_1 \cdot I_{CC}} \right] \quad (II.38)$$



$K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$  et  $m$  sont les paramètres de la diode qui sont calculés indépendamment à partir des conditions standard test météorologiques (STC).

Il est à noter que l'équation (II.34) est applicable que pour un niveau d'insolation  $E_{sref}=1000\text{w/m}^2$  et de température  $T_{jref}= 25^\circ\text{C}$ , relatif aux conditions standards de fonctionnement. Quand l'éclairement et la température varient, le courant  $I_{pv}$  et la tension  $V_{pv}$  changent suivant les équations suivantes :

$$\Delta T = T_j - T_{jref} \quad (\text{II.39})$$

$$\Delta I = \alpha_{cc} \cdot \left( \frac{E_s}{E_{sref}} \right) \cdot \Delta T + \left( \frac{E_s}{E_{sref}} - 1 \right) \cdot I_{cc} \quad (\text{II.40})$$

$$\Delta V = \beta_{oc} \cdot \Delta T + R_s \cdot \Delta I \quad (\text{II.41})$$

Avec :

$\Delta I_{pv}$  : Variation du courant (A).

$\Delta V_{pv}$  : Variation de la tension (V).

$\Delta T_j$  : Variation de la température ( $^\circ\text{C}$ ).

$\alpha_{cc}$  : Coefficient un coefficient de température, d'incrément de courant  $I_{cc}$  quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ( $\text{A}/^\circ\text{C}$ ) sous les conditions standard de fonctionnement.

$\beta_{oc}$  : Coefficient de température, d'incrément de température  $V_{oc}$  quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ( $\text{A}/^\circ\text{C}$ ) sous les conditions standard de fonctionnement et d'incrément de la tension.

Les nouvelles valeurs de la tension et de courant photovoltaïque sont donnée par :

$$V_{pv,nouv} = V_{pv} + \Delta V \quad (\text{II.42})$$

$$I_{pv,nouv} = I_{pv} + \Delta I \quad (\text{II.43})$$

### ➤ Les paramètres du panneau Suntech sous conditions (STC) :

Les constructeurs des panneaux photovoltaïques fournissent les paramètres du panneau ( $I_{cc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_m$ ,  $V_m$ ,  $P_m$ ) sous les conditions standard de fonctionnement (une insolation de  $1000\text{W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ , 1.5 AM). Le tableau (II.4) montre les paramètres du panneau photovoltaïque de marque SUNTECH, qu'on va utiliser dans notre étude.

Paramètres	valeurs
Puissance maximale du panneau $P_m$	80 W
Courant au point de puissance maximale $I_m$	4.58 A
Tension au point de puissance maximale $V_m$	17 V
Courant de court-circuit $I_{CC}$	4.95 A
Tension en circuit ouvert $V_{oc}$	21.9 V
Coefficient d'incrémentatation du courant $I_{cc}$ ( $\alpha_{cc}$ )	3 mA/°C
Coefficient d'incrémentatation de la tension $V_{oc}$ ( $\beta_{oc}$ )	-150 mV/°C

**Tableau (II. 4) :** Plaque signalétique du panneau photovoltaïque Suntech

➤ **Calcul de nombre du panneau photovoltaïque :**

$$N_{pv} = Ent \left[ \frac{P_{pv}}{P_{pv(\text{unitaire})}} \right] \quad (\text{II.44})$$

$$N_{pv} = Ent \left[ \frac{370}{80} \right] = 4.625 \simeq 5 \text{ panneaux} \quad (\text{II.45})$$

Donc le nombre de panneau photovoltaïque qu'on va utiliser dans notre étude est de 5.

$N_{pv}$  : nombre du panneau photovoltaïque.

$P_{pv}$  : Puissance du champ photovoltaïque (W).

$P_{pv(\text{unitaire})}$  : Puissance d'un module photovoltaïque (W).

### II.3 Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ du générateur photovoltaïque [2] :

Les caractéristiques d'un panneau dépendent de l'ensoleillement et de la température. Selon la technologie du générateur photovoltaïque, les variations des paramètres seront différentes. Le tracé des caractéristiques courant-tension et puissance-tension du générateur photovoltaïque à une diode est obtenu avec le logiciel MATLAB/Simulink sous différentes valeurs d'ensoleillement et de température.

➤ **Influence de l'ensoleillement [2]:**

Pour voir l'influence de l'ensoleillement, nous avons tracé les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour différentes valeurs d'ensoleillement et à une température constante  $T_{jref} = 25^\circ\text{C}$ .

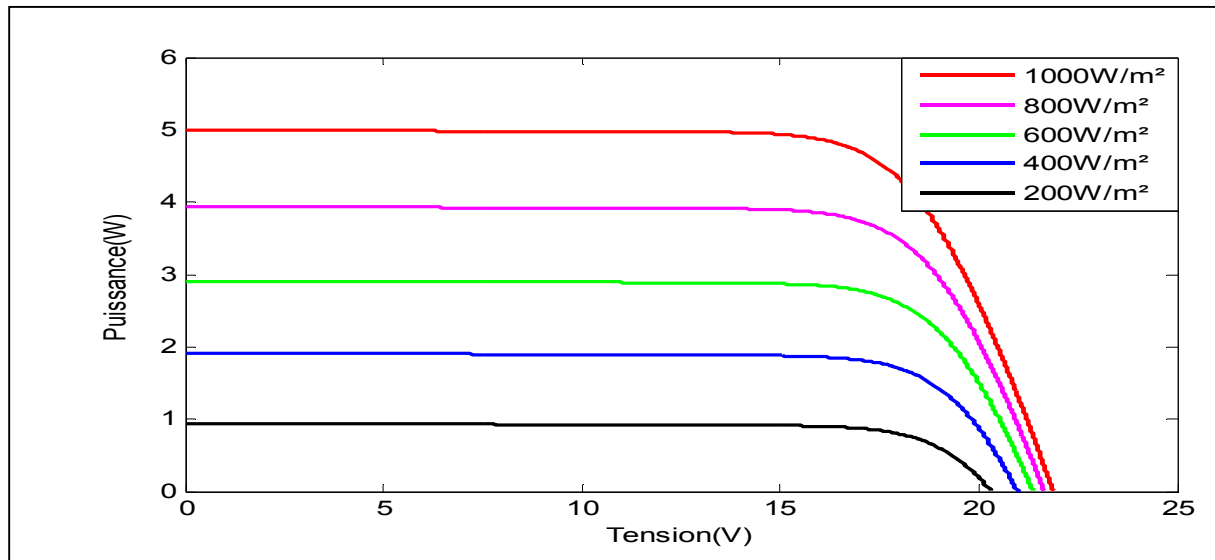


Figure (II.4) : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique  $I_{pv} = f(V_{pv})$

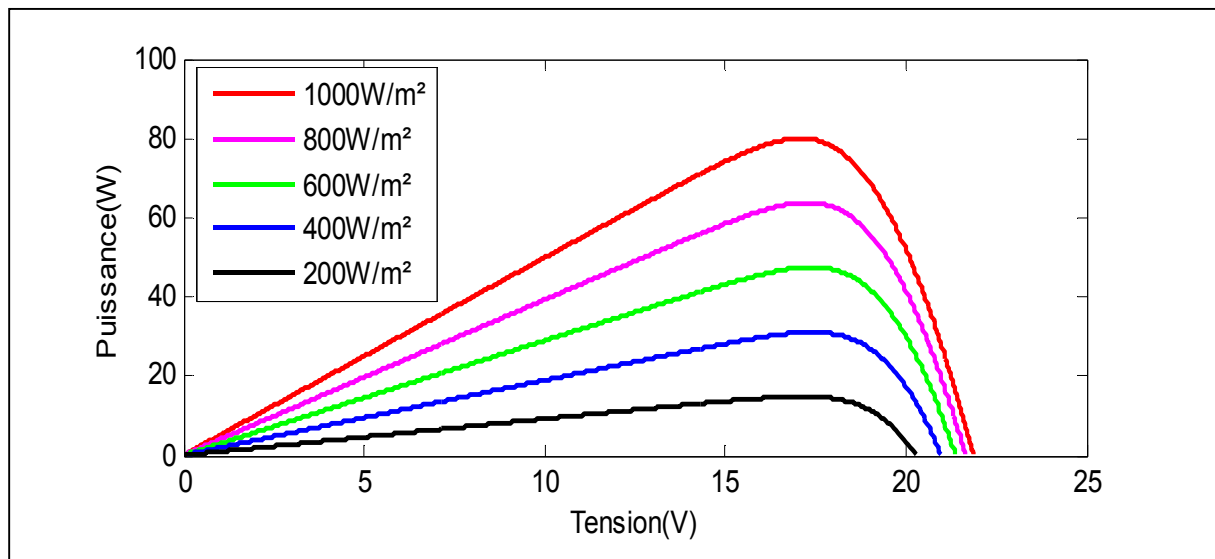


Figure (II.5) : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique  $P_{pv} = f(V_{pv})$

### Discussion des résultats :

Avec la variation de l'ensoleillement, les courbes obtenues pour les caractéristiques courant-tension et puissance-tension sont illustrées dans les figures (II.4-II.5)

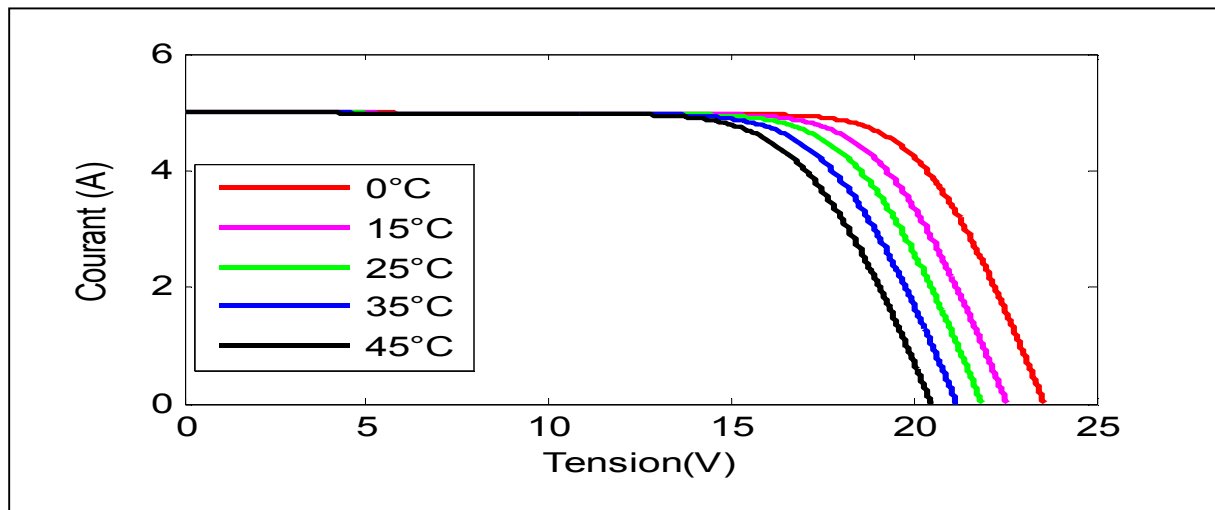
On remarque que :

- ✓ La variation de l'ensoleillement entraîne une diminution de la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible ensoleillement.

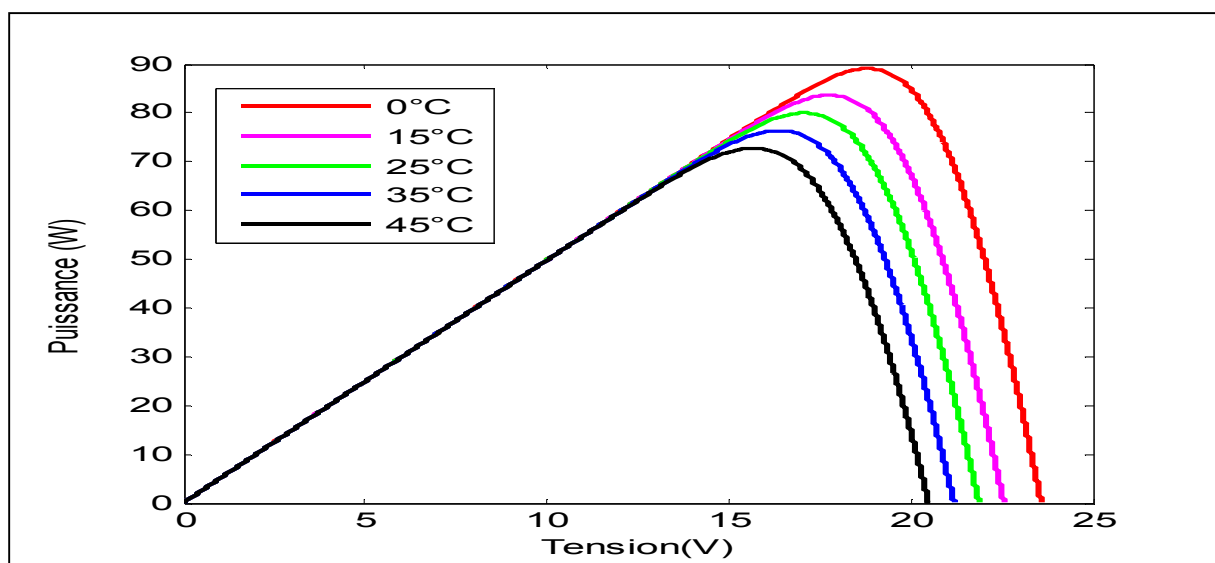
- ✓ Le courant produit par la photopile ( $I_{ph}$ ) est pratiquement proportionnel au flux lumineux. Par contre, la tension (V) aux bornes de la jonction varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction (NP) du matériau lui-même.
- ✓ L'ensoleillement a une influence importante sur la valeur de la puissance optimale, car cette dernière chute si l'ensoleillement diminue.

➤ **Influence de la température [2]:**

Pour voir aussi l'influence de la température sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension, nous avons fait le tracé de ces caractéristiques pour différents niveaux de température, mais à un ensoleillement constant  $E_s=1000\text{w/m}^2$ .



**Figure(II.6) :** Influence de la température sur la caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$



**Figure(II.7) :** Influence de la température sur la caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$

**Discussion des résultats :**

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi conducteur sont très sensibles à la température.

Avec la variation de la température, à un ensoleillement maintenu constant  $1000\text{w/m}^2$  les courbes obtenues sont illustrées dans les figures (II.6-II.7).

On remarque que :

- ✓ La température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert décroît.
  
- ✓ L'augmentation de la puissance optimale va dans le sens inverse de la température.

**II.3 Conclusion :**

Ce chapitre a fait l'objet d'une approche générale sur les différents modèles du panneau photovoltaïque, nous avons montré bien l'influence de la température et l'éclairement sur ces panneaux, et on constate que la puissance ne dépend pas seulement de la température mais dépende aussi de l'éclairement.

# *Chapitre III*

## *Modélisation et simulation du système de pompage*

## Chapitre III : Modélisation et simulation du système de pompage

---

### III. Introduction :

Après avoir étudié et citer les différents composants du système photovoltaïque, aussi que l'influence des paramètres de ses composants sur le système, nous procédons à la modélisation du système.

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. À ce niveau, la condition qui s'impose c'est de connaître les critères d'entrées (donnée de base) relatives aux équipements.

Dans ce chapitre on va modéliser le système de pompage complet avec stockage de batterie notre système est composé de :

- Moteur asynchrone monophasé.
- Pompe centrifuge.
- Convertisseur onduleur (DC/AC).
- Batterie au plomb.

### III.I Modélisation de moteur asynchrone monophasé [15]:

L'intérêt d'utilisation des machines électriques à courant alternatif est d'éliminer les Inconvénients des machines à courant continu (présence de balais, maintenance coûteux, prix élevé, lieu d'installation approprié) tout en gardent les avantages (la simplicité de la commande du flux et du couple a partir des courants d'excitation et des courant d'induit).

Dans ce chapitre, après présentation du principe de fonctionnement, nous envisageons de modéliser la machine asynchrone monophasée dans la configuration de Park, alimenté par un onduleur monophasé.

#### III.1.1 Généralités sur les moteurs asynchrones monophasés

Les moteurs asynchrones monophasés sont des moteurs utilisés pour des applications de petite puissance la vitesse de rotation d'un moteur asynchrone monophasé est toujours inférieur a la vitesse de synchronisme, ces moteur ont généralement des puissances inférieur a 1Kw, ils sont utilisé dans l'industrie et les installations domestique ou ils équipent une bonne partie des appareils électroménagers [15].

## Chapitre III : Modélisation et simulation du système de pompage

### III.1.2 Constitution :

La machine asynchrone monophasée est constituée de deux parties essentielles, la première fixe appelée stator et la deuxième tournante appelée rotor [15].

#### ➤ 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 [15].

$$N_s = \frac{f_s}{p} \quad (III.1)$$

La vitesse angulaire :

$$\Omega_s = 2\pi N_s \quad (III.2)$$

Tel que  $p$  est le nombre de paire 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 créé par le stator, sur un axe fixe avec une vitesse de rotation  $N_r < N_s$ , qui correspond à une vitesse angulaire ( $\Omega_r < \Omega_s$ ) [15].

Le rapport :

$$\frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (III.3)$$

Est appelé glissement du rotor par rapport au champ tournant du stator; on peut varier la vitesse  $N_r$  du moteur asynchrone qui est égal à

$$N_r = \frac{f}{p} \cdot (1 - g) \quad (III.4)$$

Par :

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

### III.1.3 Principe de fonctionnement

La force magnétomotrice (f.m.m) statorique crée un flux alternatif pulsant pouvant être décomposé en deux flux de même amplitude et tourne avec la même vitesse mais dans des



## Chapitre III : Modélisation et simulation du système de pompage

sens différents, ce qui développe sur le rotor deux couples de mêmes amplitudes agissant respectivement dans le sens direct et inverse. Chaque flux induit dans le stator des courants et rend à l'entraîner dans le même sens que lui, un moteur asynchrone est donc équivalent à deux moteurs triphasés identiques dont les rotors sont situés sur le même arbre, les enroulements statoriques sont connectés en série de façon à ce que le champ magnétique engendrés tournent dans l'espace en inverse [17].

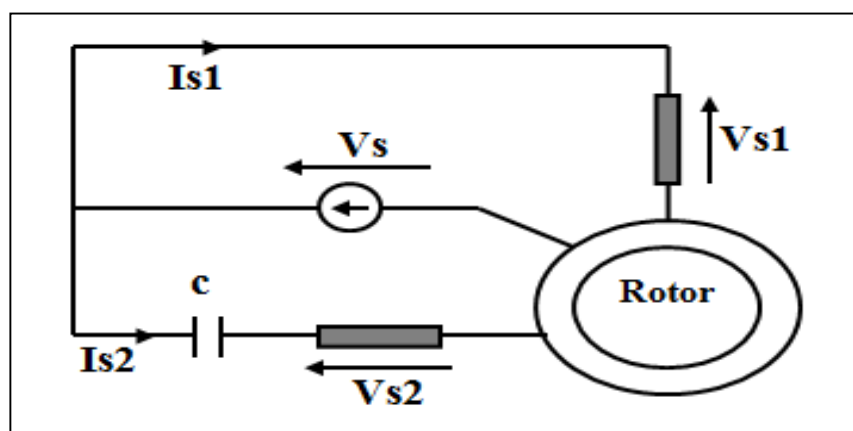
Le moment du couple électromagnétique du moteur monophasé est la somme algébrique des moments des couples des moteurs triphasés équivalents.

### III.1.4 Principe de démarrage :

Pour démarrer un moteur asynchrone monophasé on le transforme en moteur biphasé en munissant le stator d'un enroulement auxiliaire [15]

- ✓ Décalé de  $90^\circ$  électriques par rapport à l'enroulement principal.
- ✓ Traversé par un courant déphasé de  $\pi/2$  sur le courant dans l'enroulement principal.

Dans un sens bien déterminé en peut avoir un meilleur fonctionnement en charge, on munit le stator d'un enroulement auxiliaire d'une façon que le champ alternatif qu'il soit produit soit perpendiculaire au champ produit par l'enroulement principal cet enroulement auxiliaire est alimenté à travers un condensateur qui déphase le courant dans les deux enroulements d'un angle environs  $\pi/2$  mais suffisant pour créé un champ tournant ; dans ce cas le couple de démarrage est non nul et relativement important, la figure(III.1) présente le schéma électrique et le couple résultant avec l'enroulement auxiliaire [17].



**Figure (III.1) :** Schéma électrique de moteur avec enroulement auxiliaire et condensateur de démarrage.

## Chapitre III : Modélisation et simulation du système de pompage

### III.1.5 La modélisation de la machine asynchrone monophasée [17] :

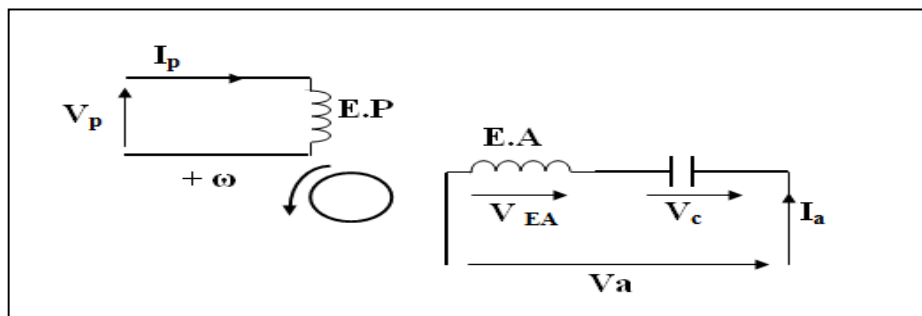
#### ➤ Hypothèses simplificatrices

Pour modéliser notre machine, on tient compte de quelques hypothèses simplificatrices :

- 1- Un entre fer uniforme.
- 2- Une distribution sinusoïdale du champ dans l'entre fer.
- 3- Perte fer négligeable.
- 4- Circuit magnétique non saturé.
- 5- Influence de l'effet de peau sur les paramètres négligée.

#### ➤ Les équations des tensions

En considérant le schéma de la (figure III.2), les tensions d'alimentation  $V_p$  et  $V_a$  pouvant être considérées comme la somme de tension [17] :



**Figure (III.2) :** Représentation schématique de la machine asynchrone monophasée à condensateur permanent(MASMCP)

Avec

- E.P : Enroulement principale.
- E.A : Enroulement auxiliaire.

D'après la (Figure III.2) les tensions sont :

$$\bar{V}_p = \bar{V}_{fp} + \bar{V}_{bp} = \bar{Z}_{dp} * \bar{I}_f + \bar{Z}_{ip} * \bar{I}_b \quad (III.5)$$

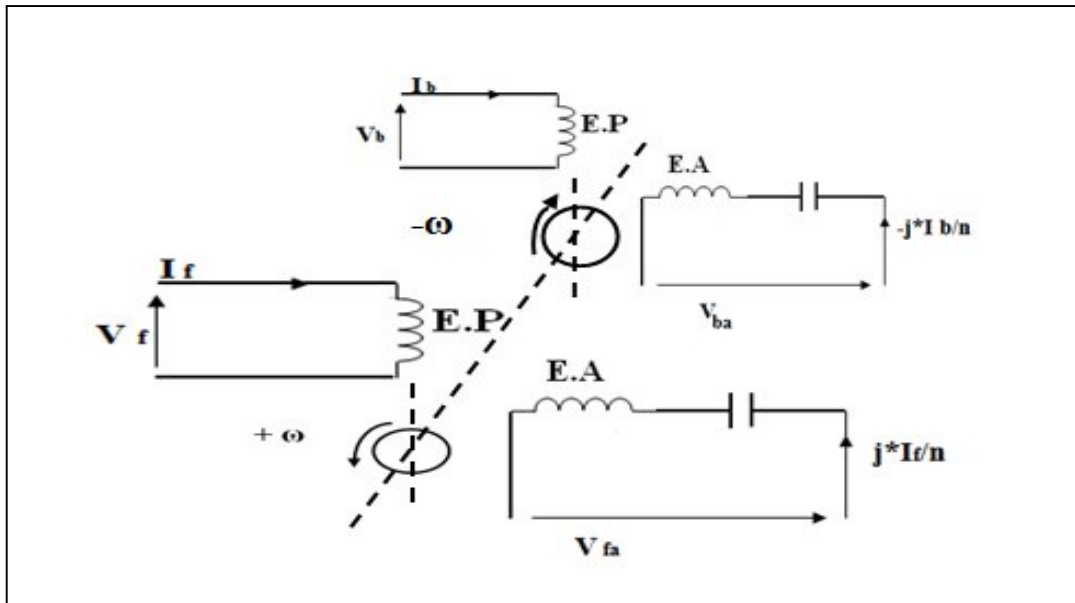
$$\bar{V}_a = \bar{V}_{fa} + \bar{V}_{ba} = \bar{Z}_{da} * \left(\frac{j}{n} * \bar{I}_f\right) + \bar{Z}_{ia} * \left(-\frac{j}{n} * \bar{I}_b\right) \quad (III.6)$$

- $V_{fp}$  : La chute de tension dans l'impédance  $Z_d$  de la phase principale.
- $V_{bp}$  : La chute de tension dans l'impédance  $Z_i$  de la phase principale.
- $V_{fa}$  : La chute de tension dans l'impédance  $Z_{da}$  de la phase auxiliaire.
- $V_{ba}$  : La chute de tension dans l'impédance  $Z_{ia}$  de la phase auxiliaire.

En raison de l'asymétrie des impédances ( $V_f$ ,  $V_b$ ) ne forment pas un système biphasé symétrique.

## Chapitre III : Modélisation et simulation du système de pompage

Le champ direct et inverse tourne par rapport au rotor à des vitesses différentes avec des glissements respectifs ( $g$ ) et  $(2 - g)$ .



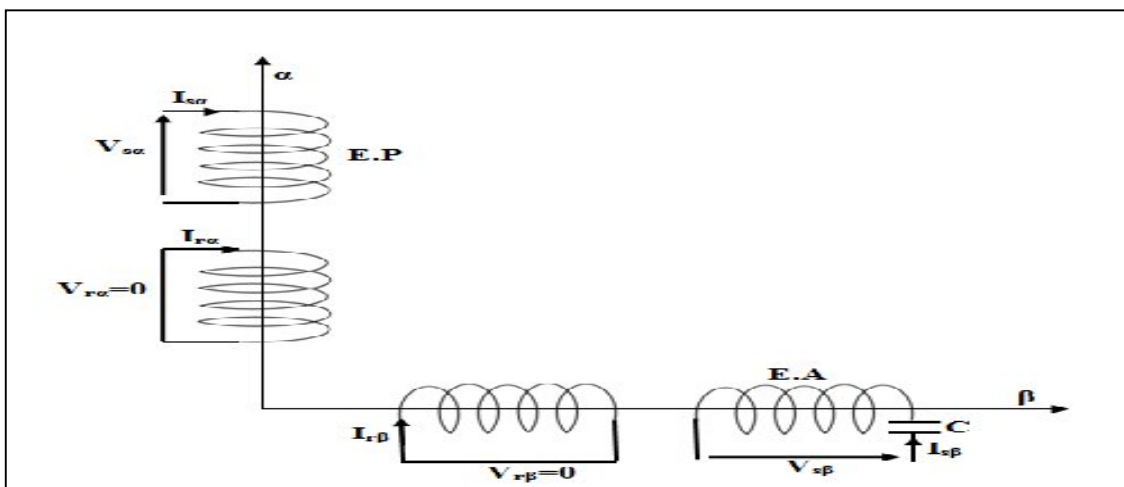
**Figure (III.3) :** Représentation schématique de la machine asynchrone monophasée [17].

D'après la (figure III.3), si on considère que la machine (1) fonctionne en régime moteur, alors la machine (2) fonctionne systématiquement en régime frein.

### III.1.6 Modèle de la machine électrique généralisé :

Le modèle de la machine électrique généralisé, comme son nom l'indique est valable pour toutes les machines à courant alternatif ou continu, triphasées ou monophasées, symétriques ou asymétriques [15].

Pour le moteur monophasé, les enroulements principaux et auxiliaires sont portés chacun par un axe. Le circuit rotorique, comme dans les moteurs asynchrones triphasés, est remplacé par deux enroulements court-circuités identiques en quadrature, voir (figure III.4) :



**Figure (III.4) :** Représentation des axes ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) de la machine asynchrone monophasée.

## Chapitre III : Modélisation et simulation du système de pompage

Comme l'asymétrie se situe au niveau du stator. Le référentiel choisi pour l'étude des processus électromagnétique de la machine est le système  $(\alpha, \beta)$  lié au stator. On considère la (F.M.M) développée par chaque phase statorique à une distribution sinusoïdale suivant la circonférence du rotor [17].

### III.1.7 Le système d'équation des tensions électriques de le MASMCP :

Les hypothèses simplificatrices précédentes, et la loi de Faraday permettent d'écrire le système comme suit [15] :

➤ Les équations statoriques :

$$V_{s\alpha} = R_{s\alpha} * I_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\alpha} \quad (\text{III.7})$$

$$V_{s\beta} = R_{s\beta} * I_{s\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\beta} + V_c \quad (\text{III.8})$$

$$0 = -I_{s\beta} + C * P * V_c \quad (\text{III.9})$$

➤ Les équations rotoriques :

$$0 = R_{r\alpha} * I_{r\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\alpha} + \omega_m * n * \Phi_{r\beta} \quad (\text{III.10})$$

$$0 = R_{r\beta} * I_{r\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\beta} - \frac{\omega_m}{n} * \Phi_{r\alpha} \quad (\text{III.11})$$

Avec les hypothèses précédentes, la relation entre les flux totalisé sur les enroulements et les courants peuvent être décrits par les équations suivantes :

$$\Phi_{s\alpha} = L_{s\alpha} * I_{s\alpha} + M_\alpha * I_{r\alpha} \quad (\text{III.12})$$

$$\Phi_{s\beta} = L_{s\beta} * I_{s\beta} + M_\beta * I_{r\beta} \quad (\text{III.13})$$

$$\Phi_{r\alpha} = L_{r\alpha} * I_{r\alpha} + M_\alpha * I_{s\alpha} \quad (\text{III.14})$$

$$\Phi_{r\beta} = L_{r\beta} * I_{r\beta} + M_\beta * I_{s\beta} \quad (\text{III.15})$$

D'après les équations précédentes des flux, on obtiendra finalement :

$$V_{s\alpha} = R_{s\alpha} * I_{s\alpha} + P * L_{s\alpha} * I_{s\alpha} + P * M_\alpha * I_{r\alpha} \quad (\text{III.16})$$

$$V_{s\beta} = R_{s\beta} * I_{s\beta} + P * L_{s\beta} * I_{s\beta} + P * M_\beta * I_{r\beta} + V_c \quad (\text{III.17})$$

$$0 = -I_{s\beta} + C * P * V_c \quad (\text{III.18})$$

$$V_{r\alpha} = 0 = R_{r\alpha} * I_{r\alpha} + P * L_{r\alpha} * I_{r\alpha} + P * M_\alpha * I_{s\alpha} + \omega_m * n * L_{r\beta} * I_{r\beta} + \omega_m * n * M_\beta * I_{r\beta} \quad (\text{III.19})$$

## Chapitre III : Modélisation et simulation du système de pompage

$$V_{r\beta}=0= R_{r\beta} * I_{r\beta} + P * L_{r\beta} * I_{r\beta} + P * M_{\beta} * I_{s\beta} - (\omega/n) * L_{r\alpha} * I_{r\alpha} - (\omega/n) * M_{\alpha} * I_{s\alpha} \quad (III.20)$$

On peut mettre le système d'équation sous la forme suivant :

$$[V] = [R][I] + P.[L][I] \quad (III.21)$$

Avec:

[V] : Vecteur de tension dans le référentiel ( $\alpha, \beta$ ) :

$$[V] = \begin{pmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \\ V_{r\alpha} \\ V_{r\beta} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (III.22)$$

[I] : Vecteur de courant dans le référentiel ( $\alpha, \beta$ ) :

$$[I] = \begin{pmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \\ I_{r\alpha} \\ I_{r\beta} \\ V_c \end{pmatrix} \quad (III.23)$$

Avec :

$$R = \begin{pmatrix} R_{s\alpha} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{s\beta} & 0 & 0 & 1 \\ 0 & n * \omega * M_{\beta} & R_{r\alpha} & n * \omega * L_{r\beta} & 0 \\ -\frac{\omega}{n} * M_{\alpha} & 0 & -\frac{\omega}{n} * L_{r\alpha} & R_{r\beta} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (III.24)$$

$$L = \begin{pmatrix} L_{s\alpha} & 0 & M_{\beta} & 0 & 0 \\ 0 & L_{s\beta} & 0 & M_{\beta} & 0 \\ M_{\alpha} & 0 & L_{r\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & M_{\beta} & 0 & L_{r\beta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C \end{pmatrix} \quad (III.25)$$

Ou :

- $M_{\alpha}$  : Inductance magnétique de l'Enroulement Principal.
- $M_{\beta}$  : Inductance magnétique de l'Enroulement auxiliaire.

## Chapitre III : Modélisation et simulation du système de pompage

- $L_{ra}$  : Inductance rotorique ramenée au nombre de spire de l'enroulement Principal.
- $L_{r\beta}$  : Inductance rotorique ramenée au nombre de spire de l'enroulement auxiliaire.

Toutes les grandeurs rotoriques suivant  $(\alpha, \beta)$  sont ramenées au nombre de spires effectif de l'enroulement Principal et de l'enroulement auxiliaire [15].

La forme finale du système est :

$$\begin{pmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \\ V_{ra} \\ V_{r\beta} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{s\alpha} + P \cdot L_s & 0 & P \cdot M_\beta & 0 & 0 \\ 0 & R_{s\beta} + P \cdot L_s & 0 & P \cdot M_\beta & 1 \\ P \cdot M_\alpha & n \cdot \omega \cdot M_\beta & R_{ra} + P \cdot L_{s\beta} & n \cdot \omega \cdot L_{r\beta} & 0 \\ \frac{\omega}{n} \cdot M_\alpha & P \cdot M_\beta & \frac{\omega}{n} \cdot L_{ra} & R_{r\beta} + P \cdot L_{r\beta} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & P \cdot C \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \\ I_{ra} \\ I_{r\beta} \\ V_c \end{pmatrix} \quad (\text{III.26})$$

Avec :

$$n = \frac{1}{a} \quad (\text{III.27})$$

$$P = \frac{d}{dt} : \text{La transformée de Laplace.} \quad (\text{III.28})$$

C : condensateur de démarrage.

### ➤ Equation du couple électromagnétique :

Le couple est donné par la relation suivante [16] :

$$C_{em} = p \cdot n \cdot M_\beta \cdot (I_{s\beta} \cdot I_{ra} - I_{s\alpha} \cdot I_{r\beta}) \quad (\text{III.29})$$

- $p$  : le nombre de paire de pôles.

### ➤ Equation mécanique :

La vitesse rotorique est une solution fondamentale de la dynamique [16]:

$$\frac{d}{dt} \cdot \Omega = \frac{1}{J} \cdot (C_{em} - C_r - f \cdot \Omega) \quad (\text{III.30})$$

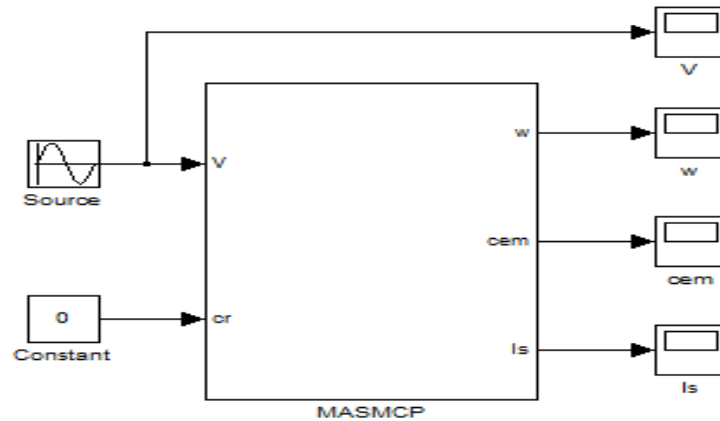
Avec:

- $J$  : Moment d'inertie du rotor et des parties tournantes de la machine.
- $f$ : coefficient de frottement visqueux.
- $C_r$  : couple de charge.
- $\Omega$  : Vitesse rotorique du moteur.

## Chapitre III : Modélisation et simulation du système de pompage

### ➤ Simulation de la machine asynchrone monophasée [15] :

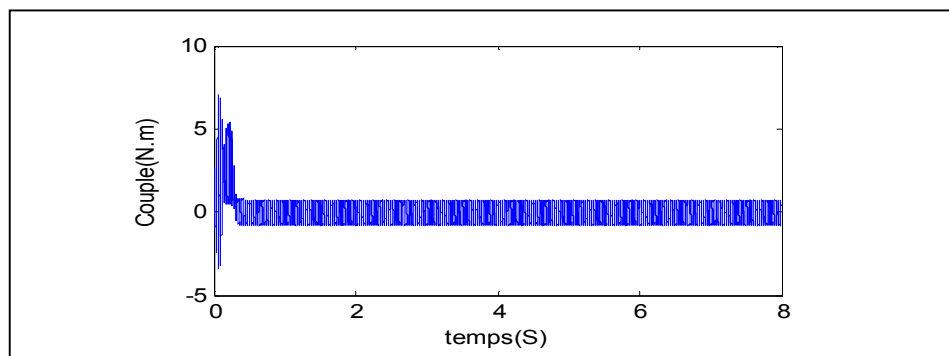
A partir des équations obtenus précédemment on établie un modèle sous matlab simulink présenté a la figure III.5.



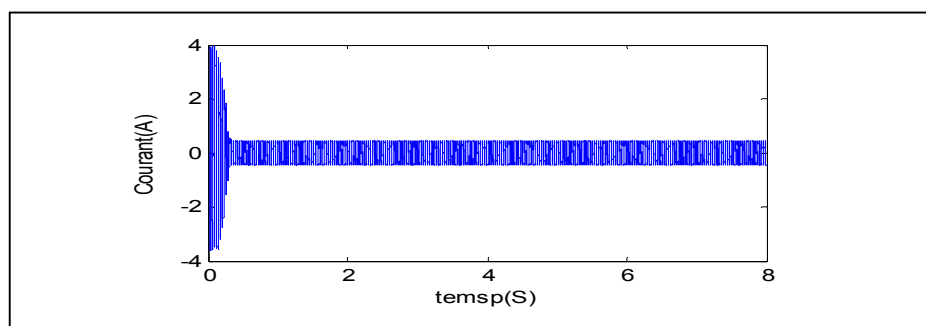
**Figure (III.5)** : Schéma de simulation machine asynchrone monophasé a condensateur permanent.

Avec le modèle simulink de la figure précédente on a établie quelque simulation sur le moteur monophasé on a obtenus se qui suit :

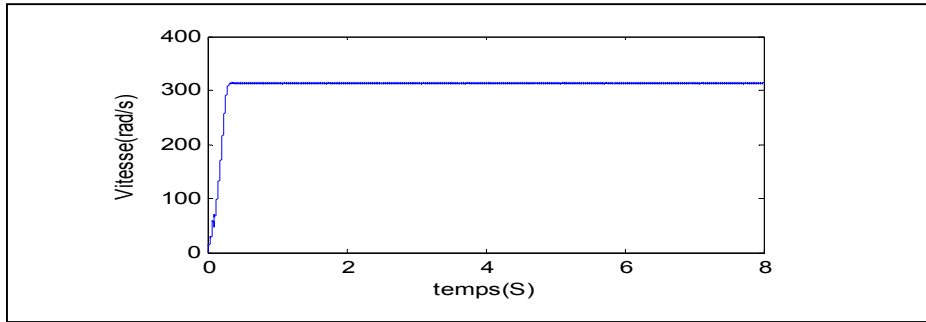
On a commencé par un essaie a vide ensuite on enchaîne avec un essaie en charge sur le moteur.



**(Figure III.6)** : Couple moteur à vide.



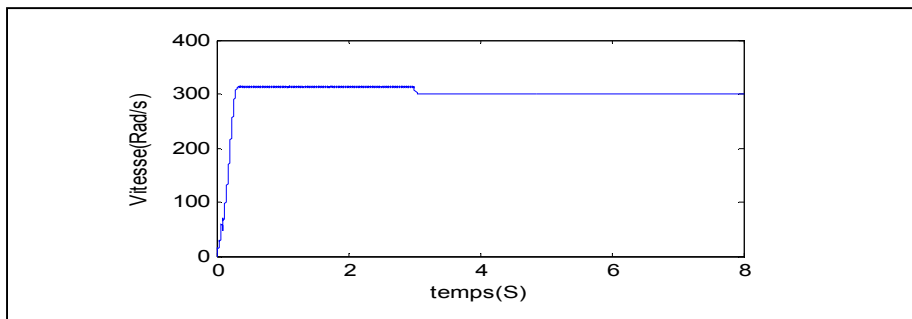
**Figure (III.7)** : Courant du moteur à vide.



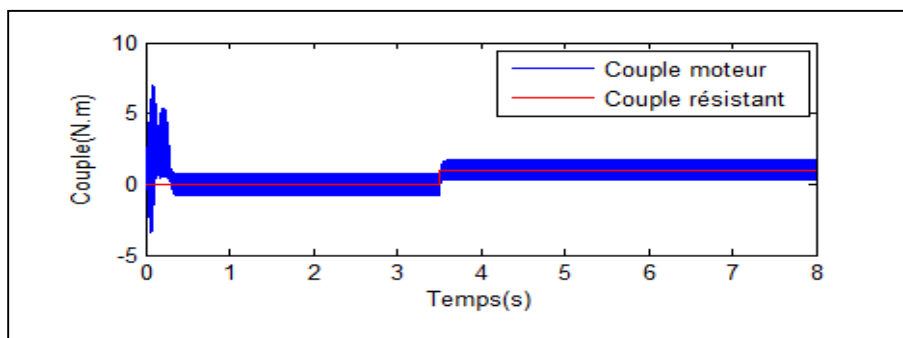
**Figure (III.8) :** Vitesse du moteur à vide.

Les 3 précédentes figures présentent le couple, le courant et la vitesse du moteur monophasé à vide. On remarque que la vitesse est de 310 rad/s et le couple oscille autour de zéro car le couple résistant est nul ou le moteur tourne à vide et le courant absorbé par ce dernier présente une amplitude importante au démarrage et se stabilise à une valeur alternative sinusoïdale.

Après avoir testé le moteur à vide, on effectue un test en charge, en effet dans ce qui suit on va appliquer une charge sur le moteur asynchrone monophasé à  $t=3.5$  s pour voir ses performances.

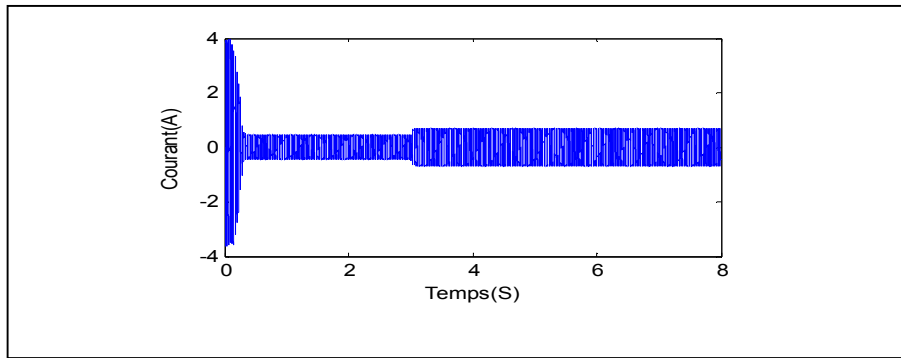


**Figure (III.9) :** Vitesse du moteur en charge.



**Figure (III.10) :** Couple du moteur en charge.





**Figure (III.11) :** Courant du moteur en charge.

La figure (III.9) présente la vitesse du moteur monophasé, on remarque que durant la phase de démarrage la vitesse augmente puis elle se stabilise à une valeur fixe et à l'instant  $t=3.5s$  la vitesse diminue légèrement sur l'effet du couple résistant.

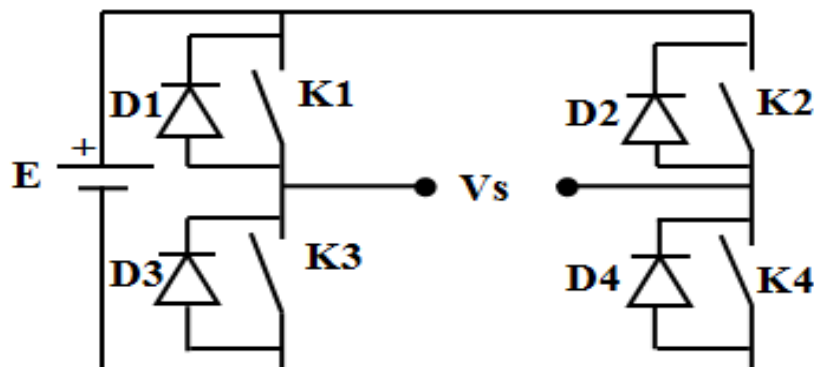
La figure (III.10) présente le couple moteur, on remarque des pics au démarrage qui sont dus au régime transitoire (couple de démarrage) et repend au couple résistant à  $t=3.5s$ .

La figure (III.11) présente le courant statorique qui repend au couple résistant.

### III.2 Modélisation de l'onduleur de tension monophasé [18]:

L'alimentation du moteur asynchrone doit être alternatif, c'est pour cette raison que on a fait appelle à un convertisseur continu alternatif (DC/AC) onduleur, en effet dans notre application on utilisera une source principale (panneau photovoltaïque) qui délivre une tension continue qui sera convertie grâce à l'onduleur monophasé.

Le convertisseur utilisé est en pont H équipé de quatre interrupteurs de puissance comme le montre la figure (III.12).



**Figure (III.12) :** Onduleur monophasé.

## Chapitre III : Modélisation et simulation du système de pompage

Avec :

- E : Tension Continue.
- K1, K2, K3, K4 : Transistor de puissance.
- Vs : Tension de sortie onduleur alternatif monophasé.
- D1, D2, D3, D4 : Diode de roue libre.

Les signaux de commande des interrupteurs K1 et K4, K2 et K3 sont complémentaires.

$$V_s = E * (K1 - K3) \quad (III.31)$$

Avec :

$K1 = K4$  et  $K2 = K3$  [19].

Les composants semi-conducteurs sont modélisés par des interrupteurs idéaux. Pour générer les signaux de commande à appliquer pour l'onduleur, on utilise la MLI à échantillonnage naturelle ou on compare le signal triangulaire à un signal modulatrice [15].

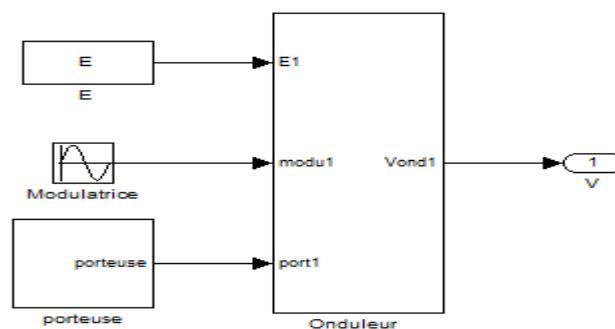


Figure (III.13) : Bloc Simulink onduleur monophasé.

### III.3 Modélisation de la pompe centrifuge [11] :

#### III.3.1 Données de base :

Les données suivantes seront nécessaires pour dimensionner la pompe et ses composants. Nous donnerons une définition des données utilisées en pompage en général.

##### ➤ Débit :

Le débit d'eau de la pompe est la quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné. Le débit est donné en litre par heure (l/h) ou en mètre cube par second ( $m^3/s$ ) [1].

## Chapitre III : Modélisation et simulation du système de pompage

### ➤ Hauteur manométrique totale :

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

$$HMT=H_g+P_{per} \quad (III.32)$$

Avec :

- $H_g$  : Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation
- $P_{per}$  : Pertes de charge produites par le frottement d'eau sur les parois des conduites (L), de leur diamètre ( $d_c$ ) 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.

### ➤ Niveau statique :

Le niveau statique ( $N_s$ ) d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau avant pompage.

### ➤ Niveau dynamique :

Le niveau dynamique ( $N_d$ ) d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau pour un pompage à un débit donné. Pour le calcul de la HMT, le niveau dynamique est calculé pour un débit moyen. La différence entre le niveau dynamique et le niveau statique est appelée rabattement ( $R_m$ ) [1].

### ➤ Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire :

Le calcul de l'énergie hydraulique nécessaire nous mène à dimensionner la pompe. Pour la dimensionner on doit tenir compte des deux facteurs suivants :

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

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

$$P_h=g*H*Q*\rho \quad (III.33)$$

Avec :

- $P_h$  : puissance communiquée au fluide par la pompe (W).
- $g$  : accélération de la pesanteur ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ).
- $H$  : hauteur manométrique totale atteinte par la pompe (m).
- $Q$  : débit volumique ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- $\rho$  : masse volumique d'eau ( $1000\text{Kg}/\text{m}^3$ ).

## Chapitre III : Modélisation et simulation du système de pompage

Les équations précédent nous ont permis d'établir le modèle simulink figure III.14 :

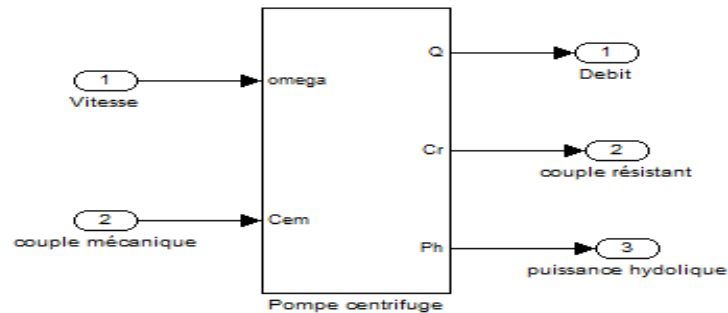


Figure (III.14) : Bloc Simulink de la pompe centrifuge.

### III.4 Modélisation de la batterie [5]:

Vue la grande diversité de type d'éléments de batterie ainsi le nombre très varie de 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.

#### III.4.1. Le modèle électrique :

C'est un modèle caractérisé par la mise en série d'une force électromotrice (f.e.m) avec une résistance variable, comme le montre la figure (III.15). Les caractéristiques de la source de tension  $E_b$  et la résistance interne  $R_b$  dépendent de la température et l'état de charge de la batterie [5].

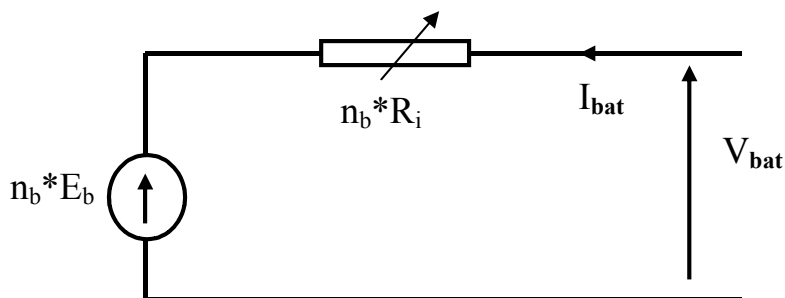


Figure (III.15) : Schéma équivalent du modèle électrique.

Pour un nombre de cellule  $n_b$  l'équation de la tension est :

$$V_{bat} = n_b \cdot E_b + n_b \cdot R_i \cdot I_{bat} \quad (III. 34)$$

Avec :

- $V_{bat}$  : Tension de batterie.
- $I_{bat}$  : Courant de la batterie.
- $E_b$  : La force électromotrice fonction de l'état de charge de la batterie.

## Chapitre III : Modélisation et simulation du système de pompage

- $R_p$ : La résistance interne, variable en fonction de l'état de charge.

Ce modèle électrique nous a permis d'établir un bloc pour la simulation de la batterie sous matlab simulink.

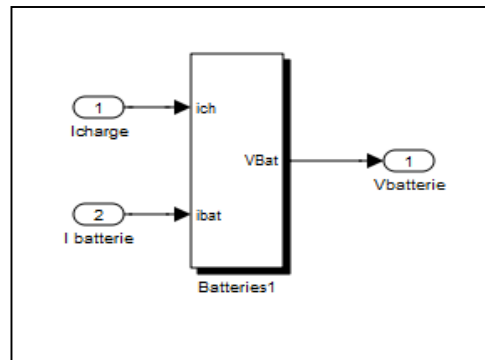


Figure (III.16) : Bloc Simulink de la batterie

### III.5 Simulation du système de pompage sous matlab :

Pour la simulation du système de pompage photovoltaïque on a mesuré l'ensoleillement de 3 journées à différentes conditions, la figure (III.17) montre le profile des journées, on appliqué cette consigne sur le système dans l'espace matlab simulink on obtient les résultats suivant :

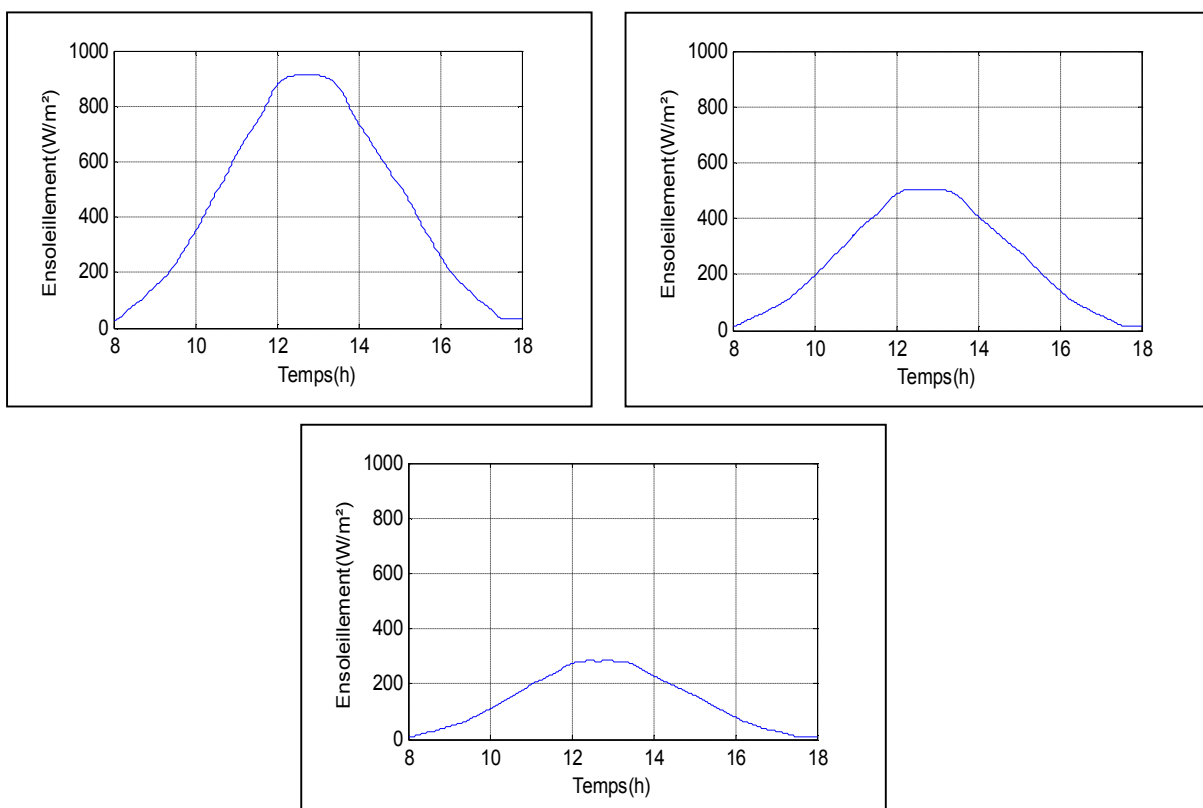


Figure (III.17) : Ensoleillement de 3 jours.

## III.5.1 Résultat de simulation :

### ➤ Du côté bus Continu :

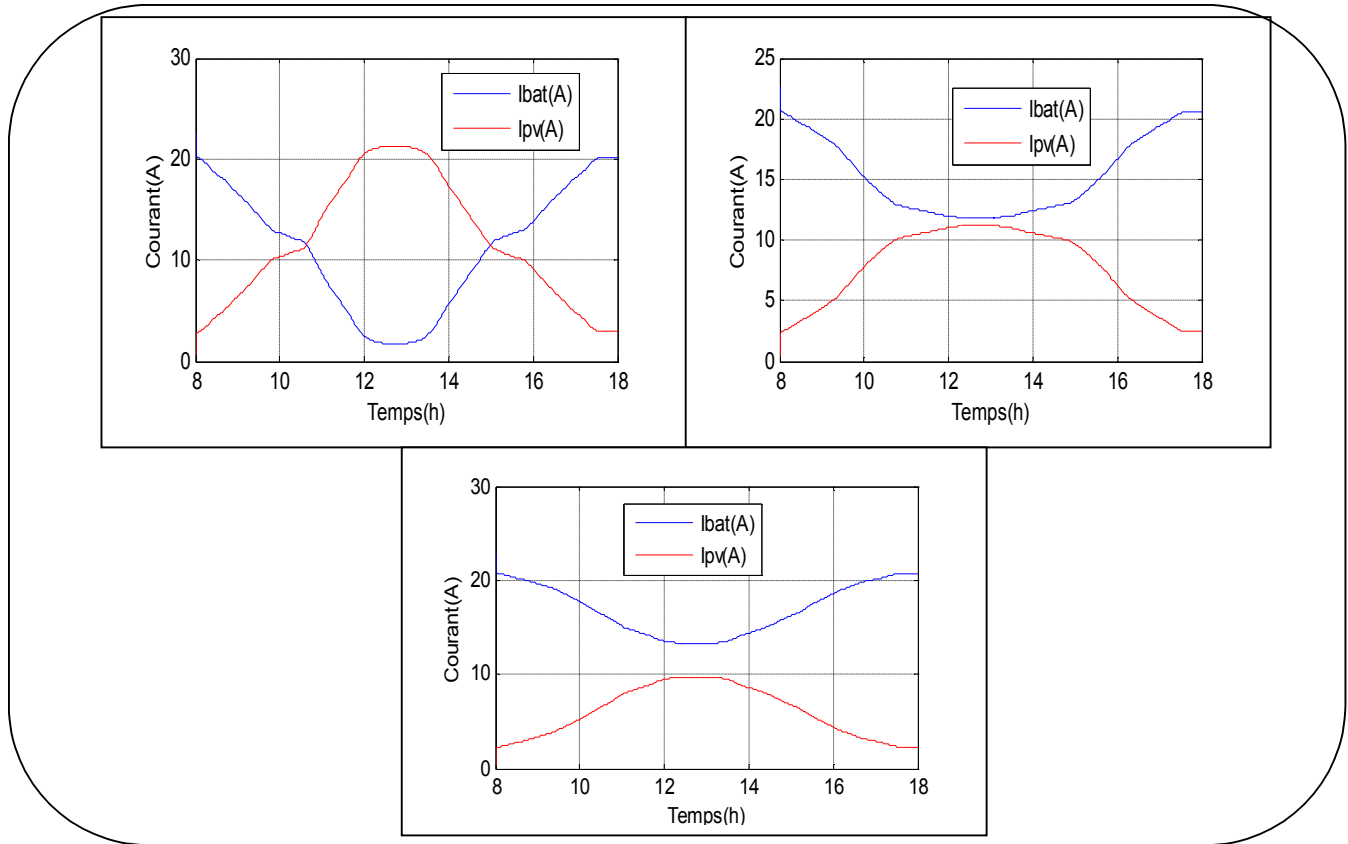


Figure (III.18) : Courant photovoltaïque et batterie

La figure (III.18) montre les deux courants photovoltaïque et batterie, on remarque que sur les trois figures le courant photovoltaïque suit parfaitement le profil de l'ensoleillement et le courant de la batterie l'inverse de se dernier car la batterie sert a stocké de l'énergie d'une part et de la restitué en cas de besoin d'une autre part, on remarque aussi que quand l'ensoleillement diminue le courant de la batterie augmente et le courant photovoltaïque diminue.

### ➤ Du côté alternative :

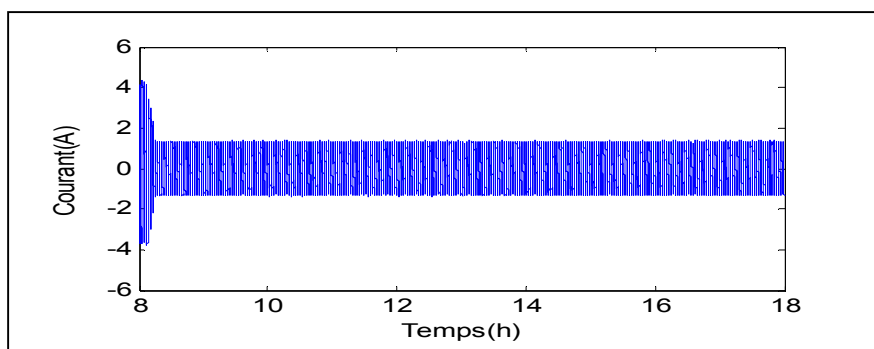
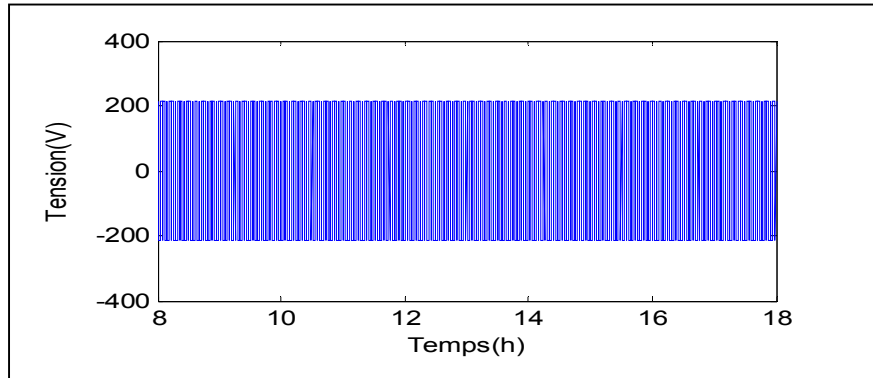


Figure (III.19) : Courant d'alimentation moteur.

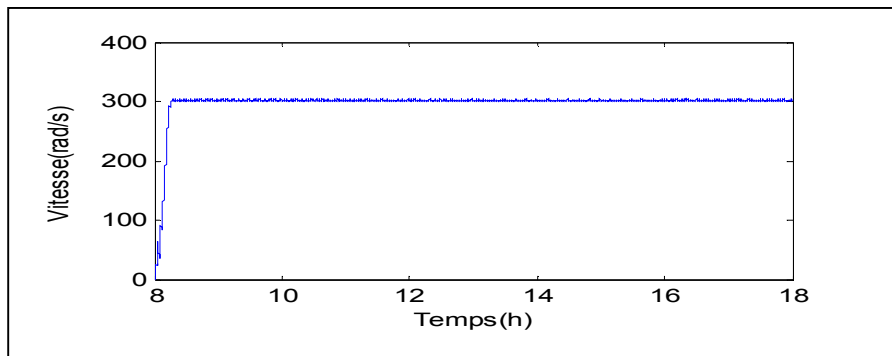


**Figure (III.20)** : Tension d'alimentation du moteur.

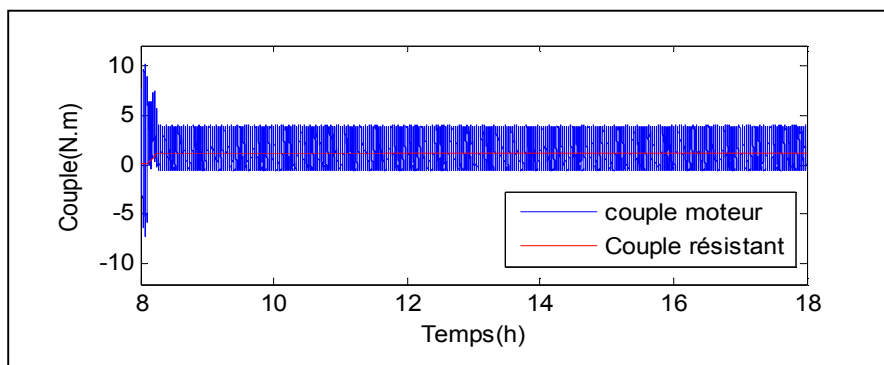
La Figure (III.19) montre le courant statorique du moteur monophasé. On remarque l'influence de la tension échantillonnée sur sa forme, on constate aussi que ce dernier répond au couple électromagnétique et présente des pics au démarrage qui sont dû au régime transitoire.

La Figure (III.20) montre la tension de sortie de l'onduleur qui alimente la machine, qui est une tension alternative échantillonnée d'amplitude (220 V).

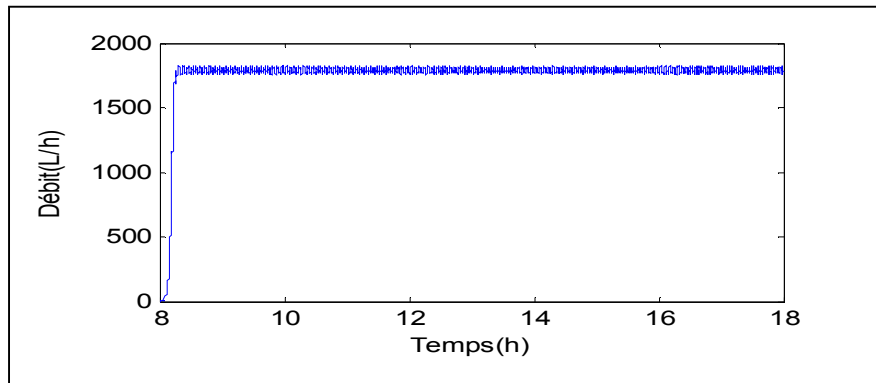
➤ **Du côté motopompe :**



**Figure (III.21)** : Vitesse du moteur.



**Figure (III.22)** : Couple électromagnétique et résistant.



**Figure (III.23) :** Débit de pompage.

La Figure (III.21) montre l'évaluation de la vitesse de rotation du rotor de la machine. On remarque la croissance de la vitesse est presque linéaire lors de la phase de démarrage puis elle se stabilise à une valeur fixe.

La Figure (III.22) présente l'allure du couple électromagnétique et résistant. On remarque que couple électromagnétique répand au couple résistant et présente des pics au démarrage qui sont dû au régime transitoire aussi. On remarque l'influence de la tension échantillonnée sur sa forme.

La Figure (III.23) présente l'allure du débit de la pompe, on constate sont évaluation au démarrage jusqu'à atteindre une valeur fixe 1800L/h car le système possède deux sources complémentaire.

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé les équations mathématiques de fonctionnement du système étudié en premier temps et en second temps on a modélisé le système de pompage complet, en dernier on a fait la simulation avec les mêmes conditions que sur le chapitre IV.



*Chapitre IV*  
*Résultats expérimentaux*

## IV. 1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons tous les résultats obtenus à partir de l'installation réalisée pour différents hauteurs manométriques totales (1, 3 et 5 mètres) durant plusieurs jours avec des différents ensoleillements. Le système réalisé est le suivant :

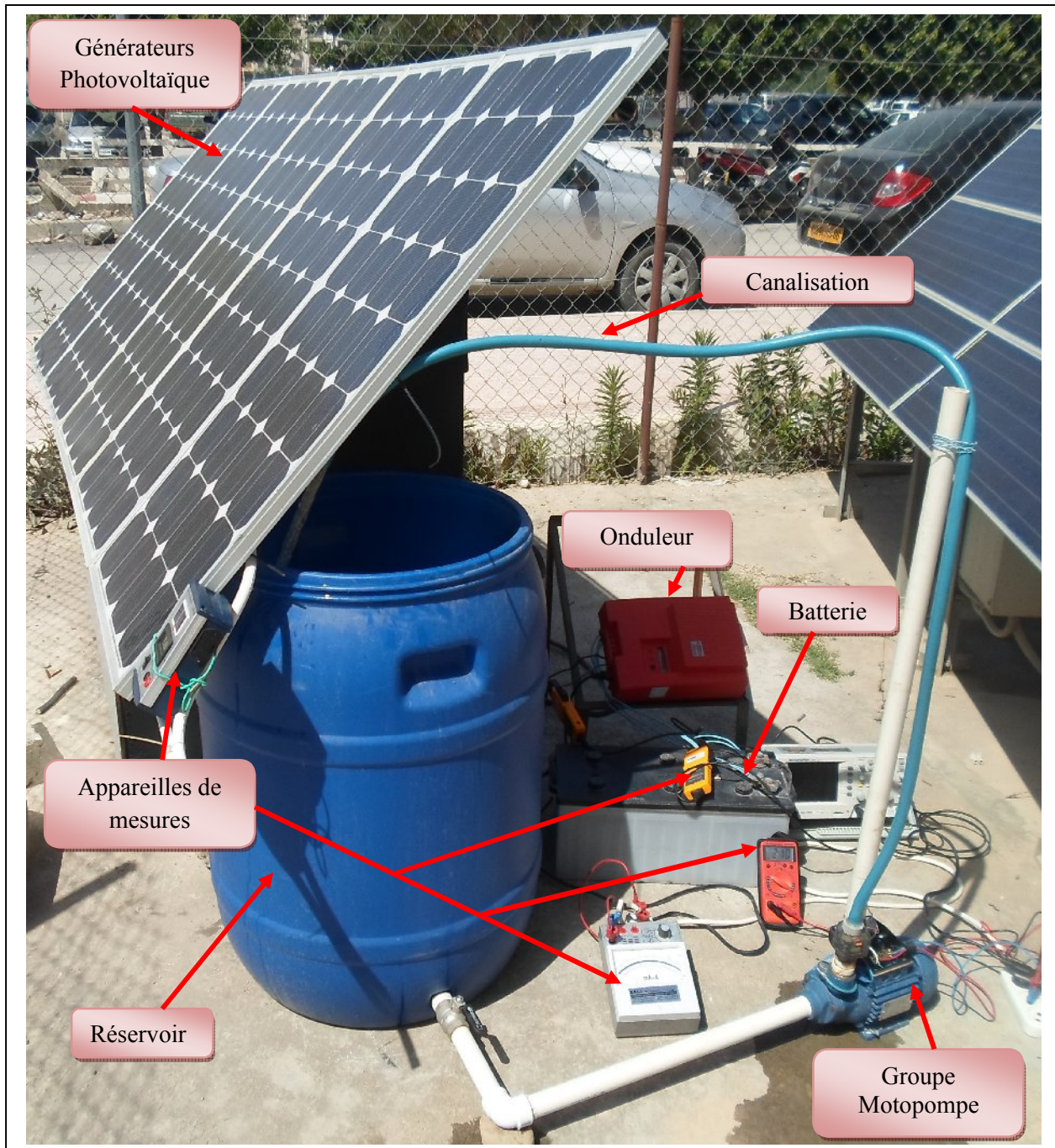


Figure IV.1 : Schéma complet de l'installation réalisée de pompage PV.

IV. 3. Présentation de différentes caractéristiques du système :

IV.3.1 ESSAI N°1

Cet essai a été effectué dans le laboratoire L.T.I.I le 18/05/2014 de 8h00 à 18h00. Les panneaux ont été exposés directement à la lumière du jour.

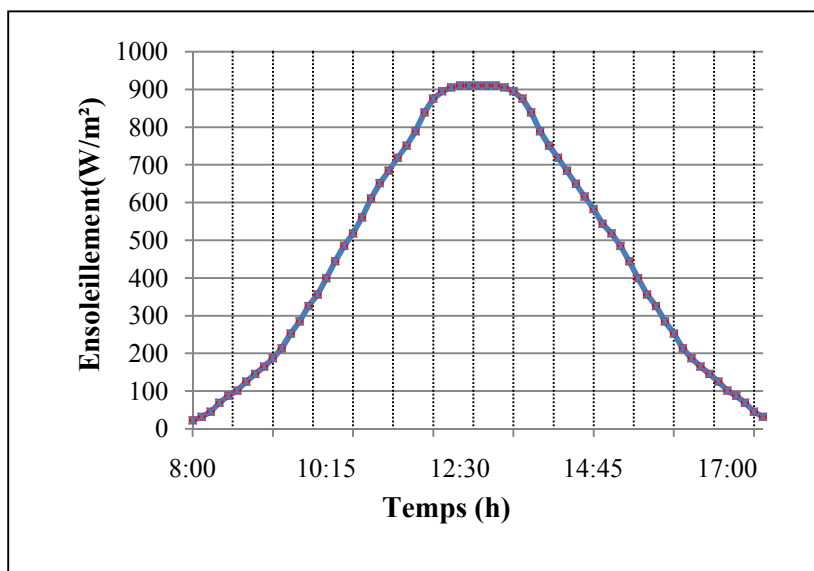


Figure IV.2 : Ensoleillement du 18/05/2014 de 8h00 à 18h00.

Plusieurs testes ont été effectués durant cette journée avec des hauteurs de (1, 3,5) mètres sur le système de pompage et on a obtenu les résultats suivants :

IV.3.1.1 Du coté bus continu:

➤ Hauteur de pompage à 1 mètre :

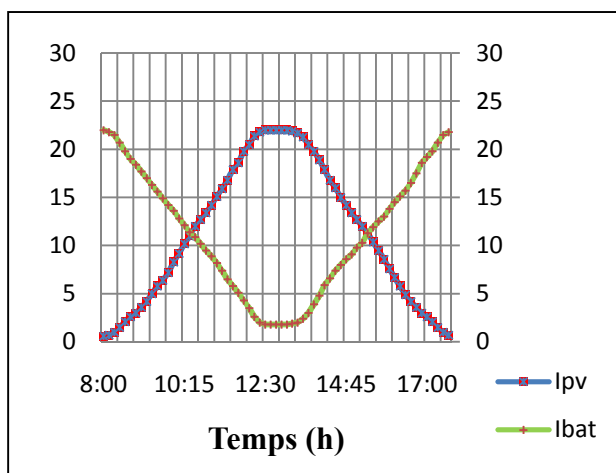


Figure IV.3 : Courants photovoltaïque et batterie à 1 mètre.

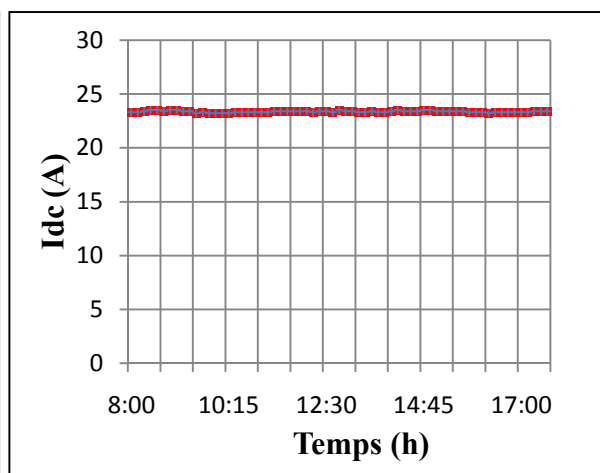


Figure IV.4 : Courant bus continu à 1 mètre.

➤ Hauteur de pompage à 3mètres :

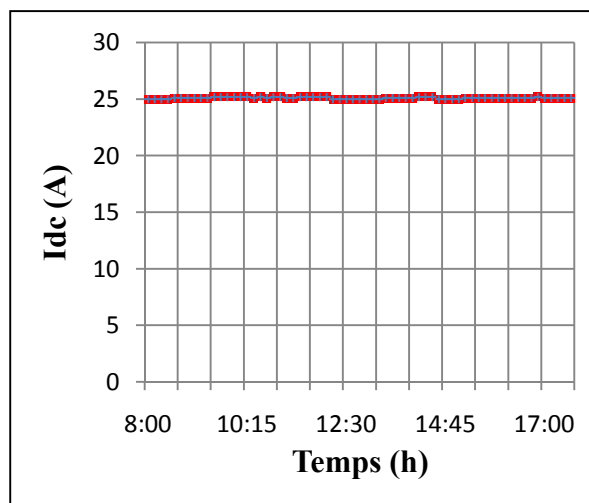
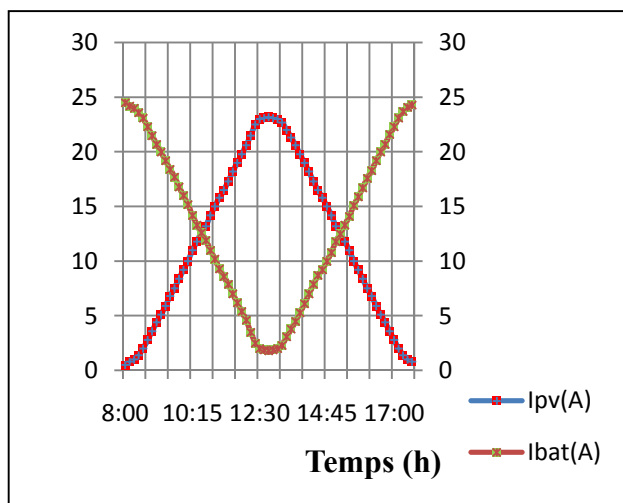


Figure IV.5 : Courants photovoltaïque et batterie à 3 mètres.

Figure IV.6 : Courant bus continu à 3 mètres

➤ Hauteur de pompage à 5 mètres :

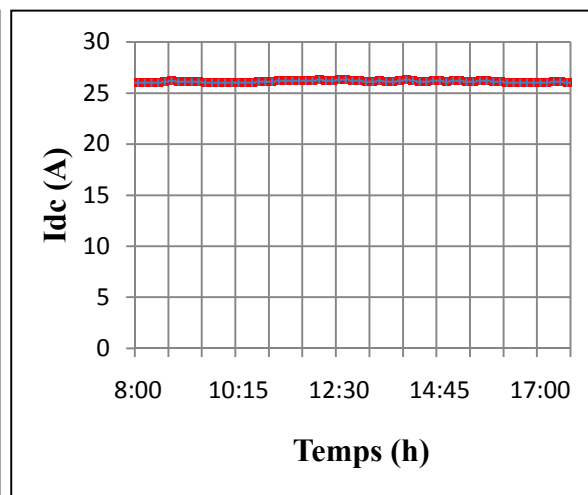
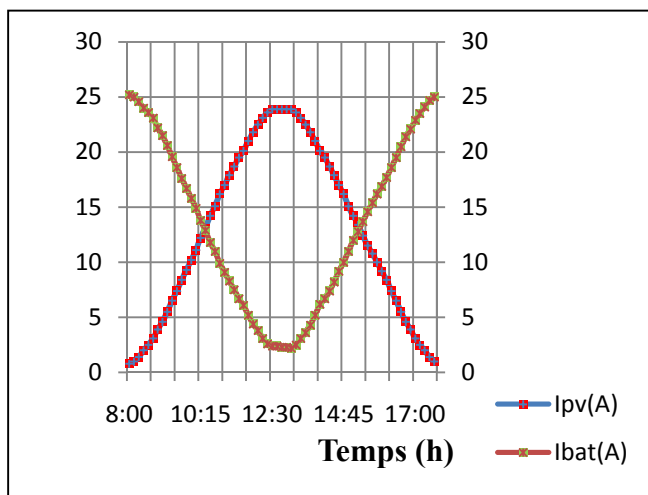


Figure IV.7 : Courants photovoltaïque et batterie à 5 mètres.

Figure IV.8 : Courant bus continu à 5 mètres.

On constate d'une part que le courant photovoltaïque est influencé par l'ensoleillement journalier, en effet sur les figures IV. (3, 5,7) on voit clairement que le courant suit le profile d'ensoleillement (figure IV.2).

D'autre part, le courant de la batterie suit l'inverse du profile du courant photovoltaïque car le système doit être alimenté en continu et quand le générateur photovoltaïque ne produit pas assez la batterie assure de complété se qui reste.

On remarque aussi que le courant de bus continu augmente avec la hauteur manométrique car quand la hauteur augmente le moteur fournie plus d'effort.

IV.3.1.2 Du côté Pompe :

Hauteur de pompage à 1 mètre :

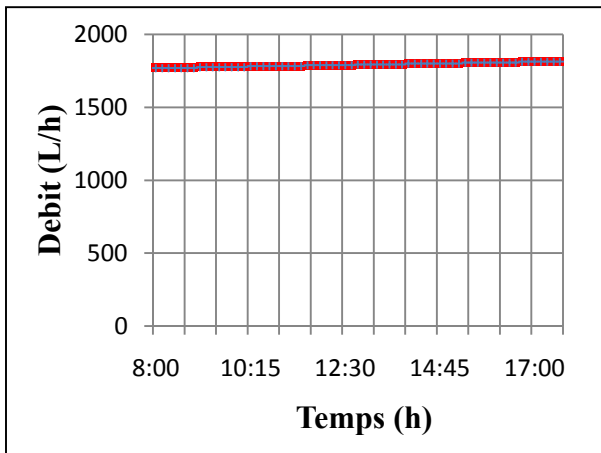


Figure IV.9 : Débit à 1m de hauteur.

Hauteur de pompage à 3 mètres :

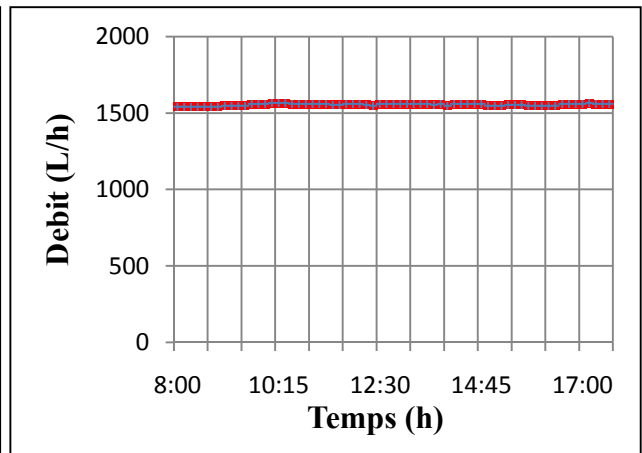


Figure IV.10 : Débit à 3m de hauteur.

Hauteur de pompage 5 mètres

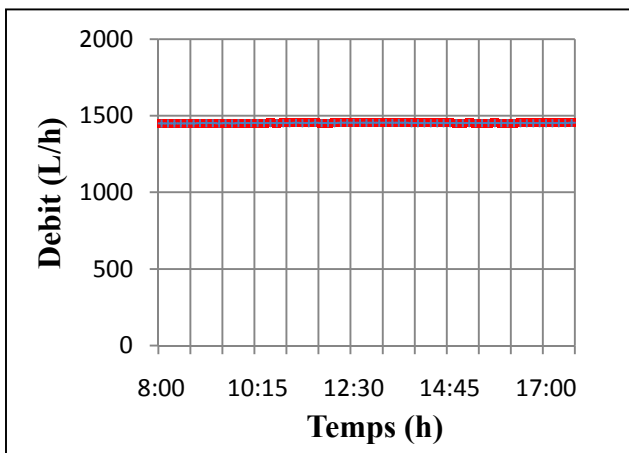


Figure IV.11 : Débit à 5m de hauteur.

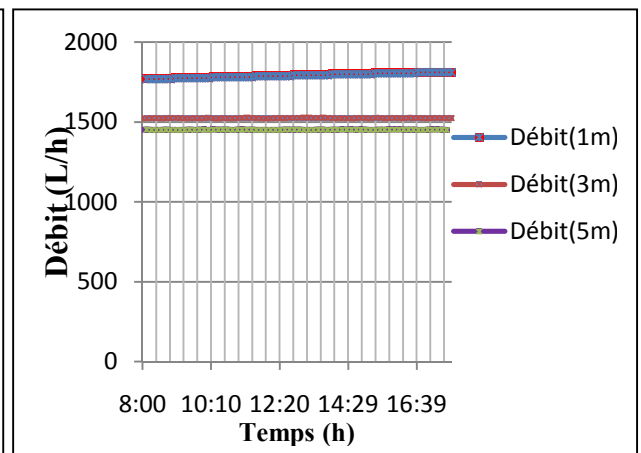


Figure IV.12 : Débit à différentes hauteurs.

On remarque que le débit diminue avec l'augmentation de la hauteur manométrique, mais il reste constant durant toute la journée grâce à la complémentarité des deux sources, en effet Quand les générateurs photovoltaïques ne produisent pas assez pour assurer ce débit la batterie se charge de restituer le courant stocké.

IV.3.1.3 Du côté Courant alternatives :

➤ Tension d'alimentation du moteur

Hauteur de pompage à 1 mètre

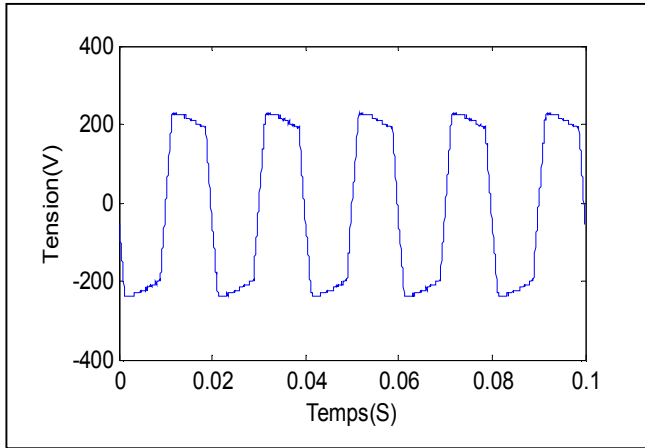


Figure IV.13 : Tension de l'onduleur à 1 mètre.

Hauteur de pompage à 3 mètre

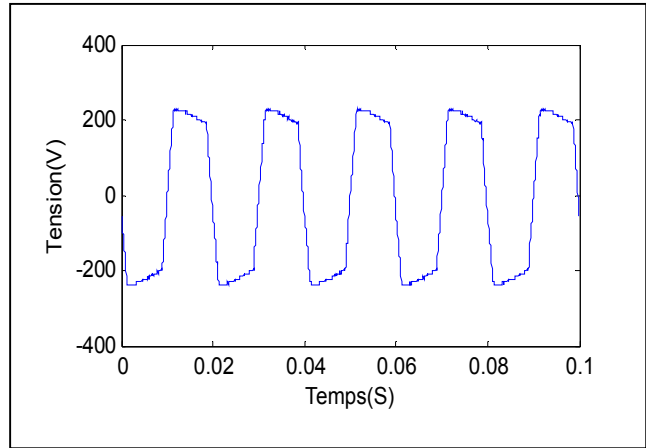


Figure IV.14 : Tension de l'onduleur à 3 mètres.

Hauteur de pompage à 5 mètre

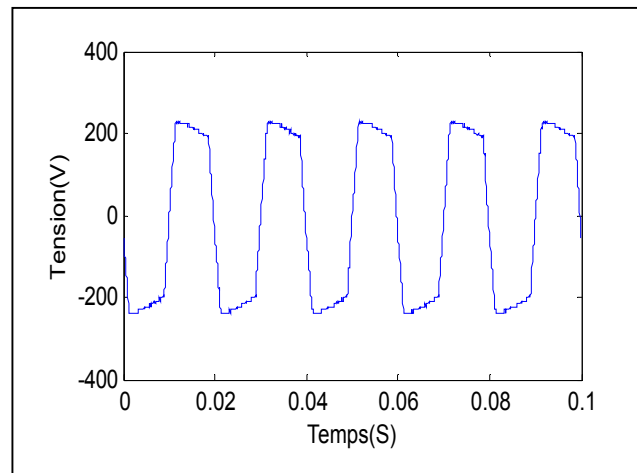


Figure IV.15 : Tension de l'onduleur à 5 mètres.

On constate que la tension d'alimentation du moteur est proche de la sinusoïde alternative de fréquence 50HZ et d'une valeur mesuré  $V_s=215$  Volt, on remarque aussi que cette dernière reste constante même si la hauteur de pompage augmente ou l'ensoleillement diminue.

➤ Courant d'alimentation du moteur

**Hauteur de pompage à 1 mètre**

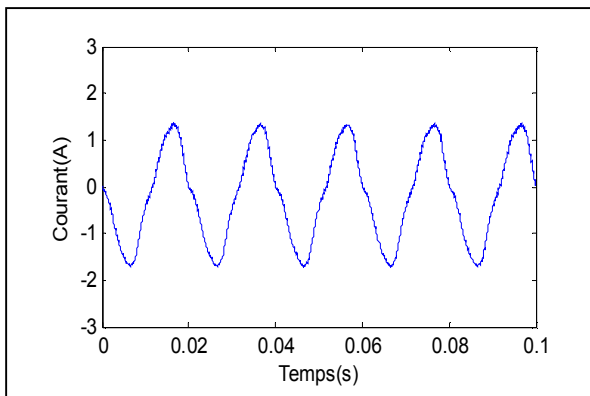


Figure IV.16 : Courant d'alimentation à 1 mètre.

**Hauteur de pompage à 3 mètres**

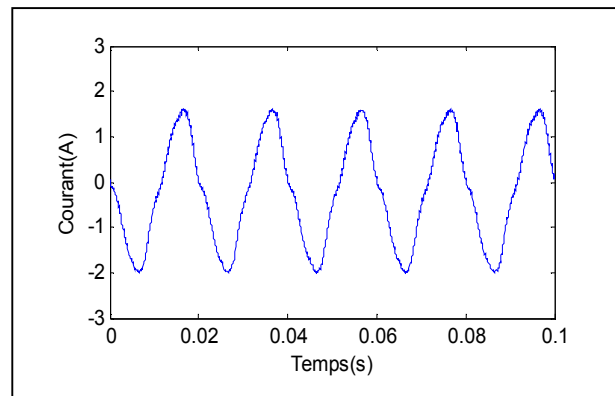


Figure IV.17 : Courant d'alimentation à 3 mètres.

**Hauteur de pompage 5 mètres**

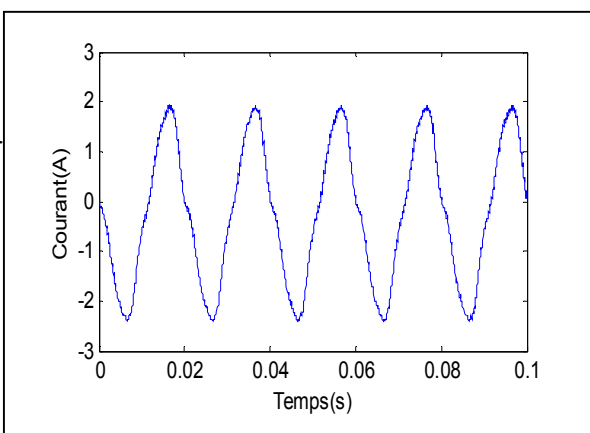


Figure IV.18 : Courant d'alimentation à 5 mètres

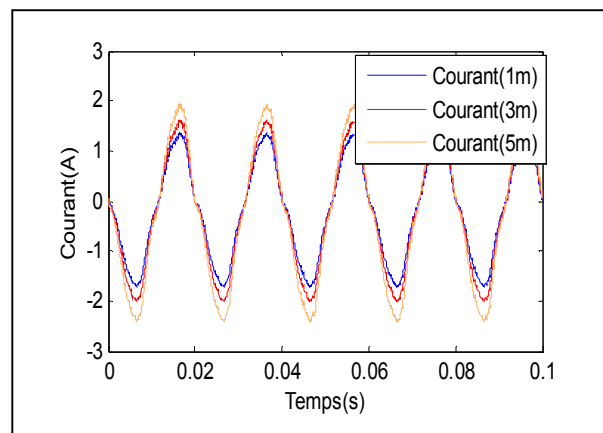


Figure IV.19 : Courants d'alimentation à différentes hauteurs.

Les trois figures (IV.16, 17 et 18) montrent le courant d'alimentation du moteur asynchrone monophasé, on remarque qu'à chaque augmentation de la hauteur manométrique le courant augmente (figure IV.19) car le moteur fournit plus d'effort pour pousser l'eau ce qui engendre une consommation de courant, autrement dit quand la hauteur manométrique augmente le couple résistant augmente donc le couple mécanique augmente ce qui engendre une consommation en plus. On conclut aussi que quelque soit l'ensoleillement ce dernier reste constant.



**IV.3.2 ESSAI N°2**

La figure IV.20 montre l'éclairement de la journée du **21/05/2014 de 8h00 à 18h00**, durant cette dernière on a relevé différent caractéristique courant tension débit.

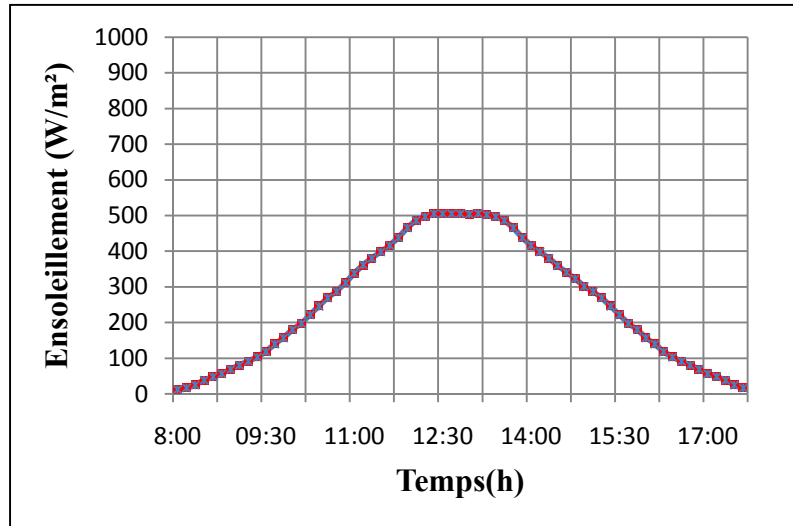


Figure IV.20 : Ensoleillement du 21/05/2014 de 8h00 à 18h00

**IV.3.2.1 Du côté bus continu:**

➤ **Hauteur de pompage 1 mètre :**

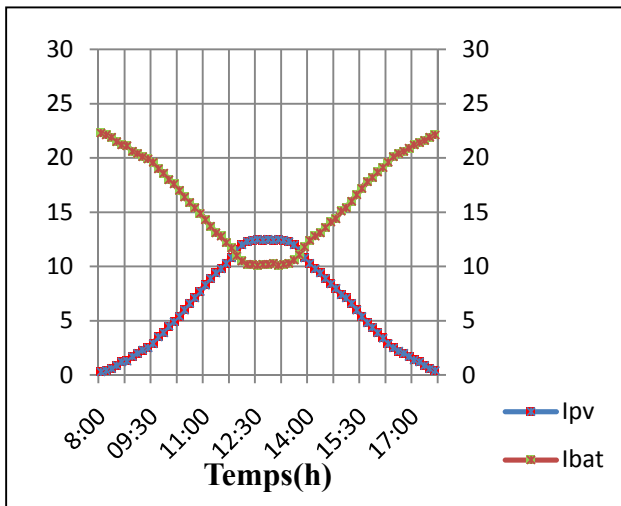


Figure IV.21 : Courants photovoltaïque et batterie à 1 mètre.

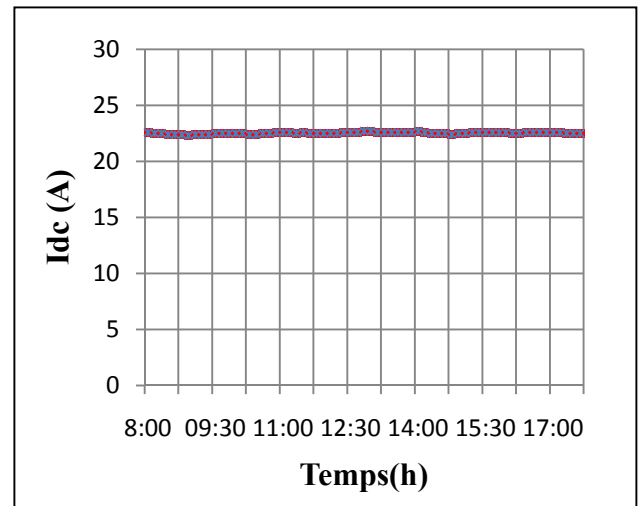


Figure IV.22 : Courant bus continu à 1 mètre.



➤ Hauteur de pompage 3 mètre :

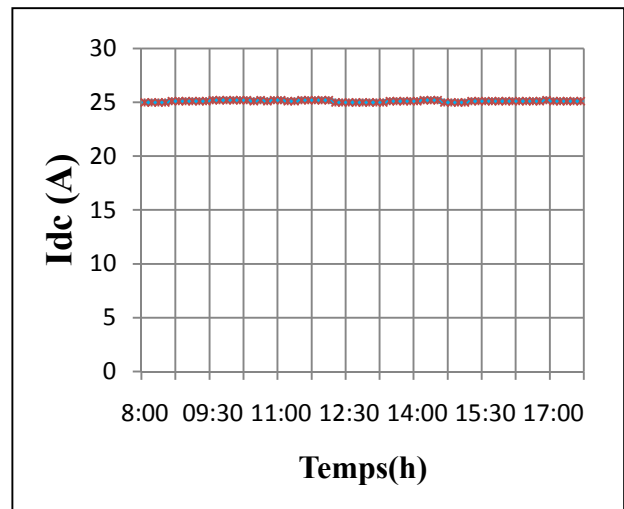
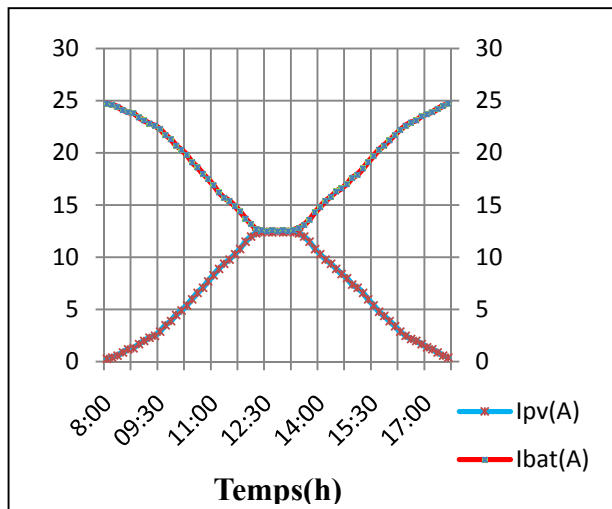


Figure IV.23 : Courants photovoltaïque et Batterie à 3 mètres. Figure IV.24 : Courant Bus Continu à 3 mètres.

➤ Hauteur de pompage 5 mètre :

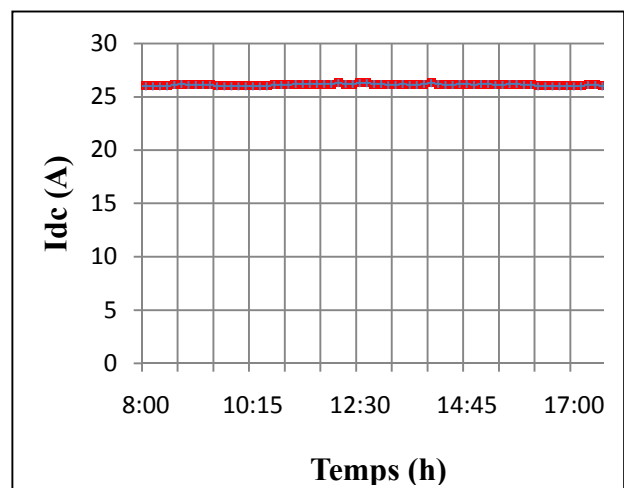
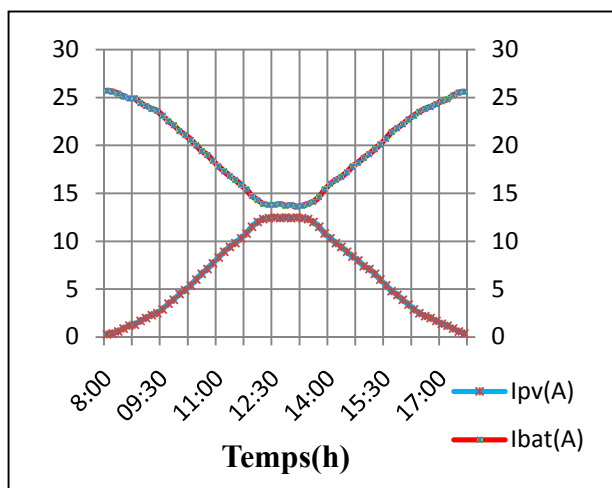


Figure IV.25 : Courants photovoltaïque et batterie à 5 mètres. Figure IV.26 : Courant bus continu à 5 mètres.

D'après les figures IV. (21,23,25) on voit que le courant photovoltaïque augmente progressivement jusqu'à atteindre son maximum entre 11h30 et 13h00, ensuite il décroît pour rejoindre des valeurs faibles, on constate aussi que ce dernier suit parfaitement le profil d'ensoleillement de la journée figure IV.20, mais le profil de courant de batterie est inversement proportionnelle a celui des générateur photovoltaïque en raison de la complémentarité des deux sources, on peut dire aussi que le fonctionnement du système a faible ensoleillement est assuré a 60% par l'énergie stocké dans la batterie.

**IV.3.3 ESSAI N°3**

La figure IV.27 montre l'ensoleillement d'une journée 26/05/2014 de 8h00 à 18h00 on constate que ce dernier augmente progressivement et atteins sa valeur maximale entre 11h30 et 13 h qui est de 300 W/m<sup>2</sup> et décent en fin d'après midi vers une valeur presque nul.

Aux cours de cette journée en a effectuer quelque testes sur le système de pompage afin de voir ces performances et on a relevé se qui suit :

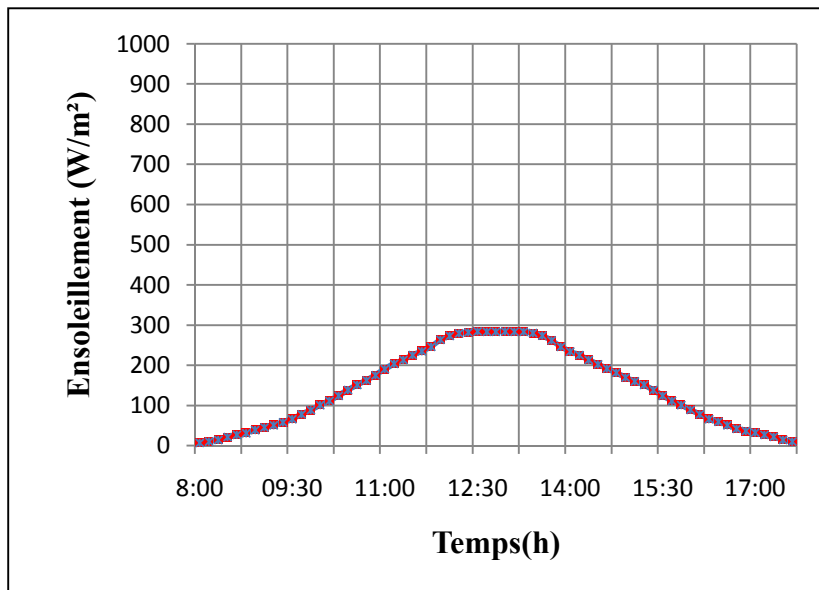


Figure IV.27 : Ensoleillement du 26/05/2014 de 8h00 à 18h00.

**IV.3.3.1 Du côté bus continus:**

➤ Hauteur de pompage 1 mètre :

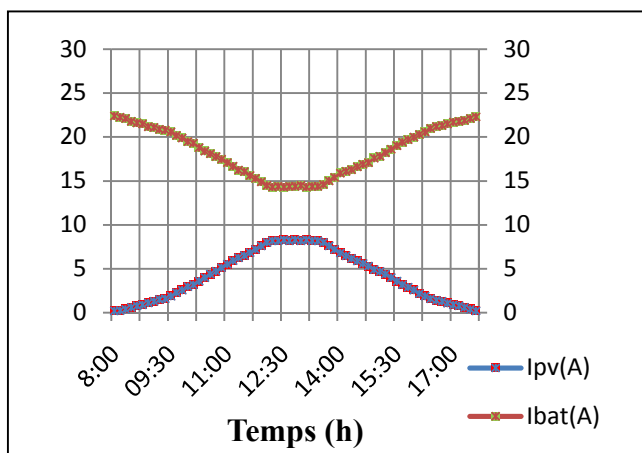


Figure IV.28 : Courants photovoltaïque et batterie à 1 mètre.

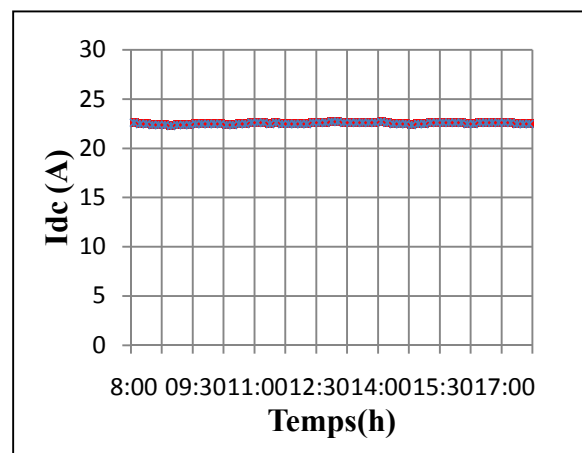


Figure IV.29 : Courant bus continu à 1 mètre.

➤ Hauteur de pompage 3 mètre :

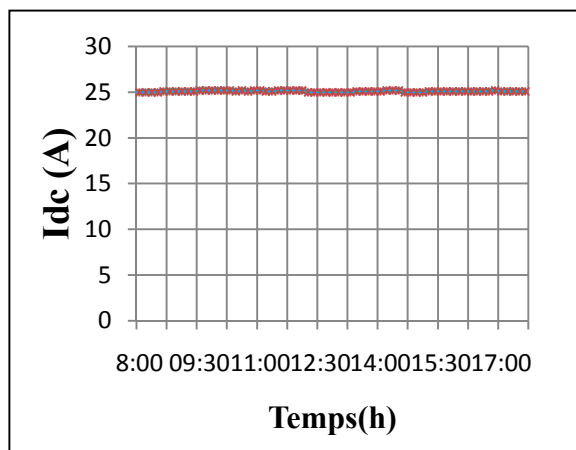
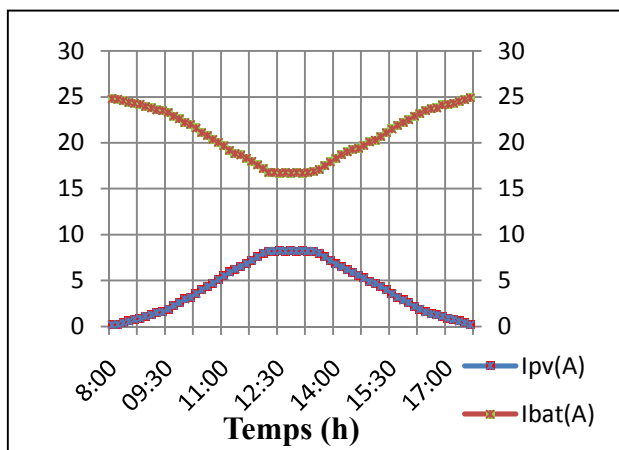


Figure IV.30 : Courants photovoltaïque et batterie à 3 mètres.      Figure IV.31 : courant bus continu à 3 mètres.

➤ Hauteur de pompage 5 mètre :

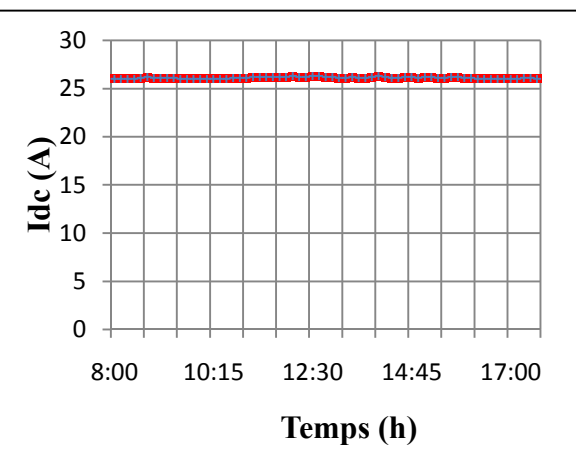
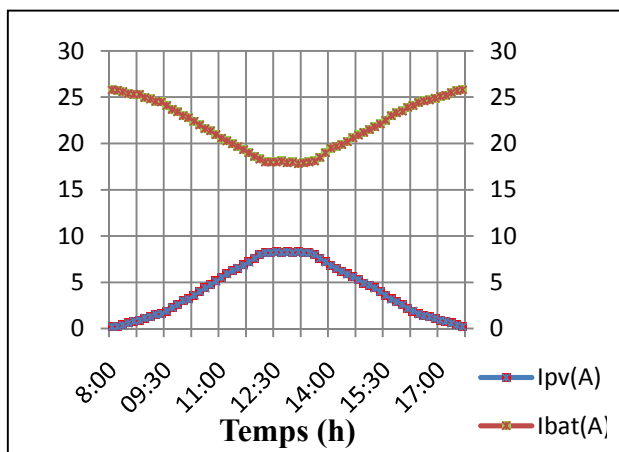


Figure IV.32 : Courants photovoltaïque et batterie à 5 mètres.      Figure IV.33: Courant bus continues à 5 mètres.

On remarque que les courants photovoltaïques suivent parfaitement la courbe de l'ensoleillement et le courant de la batterie l'inverse de ce dernier.

A des ensoleillements faibles on constate que le courant photovoltaïque est faible et la batterie assure le fonctionnement du système à environ 80%.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté toutes les caractéristiques obtenus du système de pompage photovoltaïque réalisé. Ce système fonctionne en système hybride (solaire et batterie en même temps) avec l'énergie solaire comme source primaire.

*Conclusion générale*

## Conclusion générale

Aujourd'hui, l'énergie photovoltaïque devient progressivement une source d'énergie à part entière, de plus en plus sollicitée pour produire de l'énergie électrique allant du domestique à de grandes centrales connectées au réseau. Cependant, il reste encore pas mal de freins à son développement en termes de manques de production, ou bien même de coûts prohibitifs rendant cette source d'énergie chère et peu fiable tout au long de la durée de vie du générateur.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne le pompage photovoltaïque avec stockage de batterie.

Avant d'aborder les objectifs de cette étude, nous avons jugé utile en premier lieu de faire le point sur l'état de l'art de l'énergie photovoltaïque. De même, un bref rappel est consacré aux différents éléments du système de pompage.

Nous avons commencé dans la seconde partie par la présentation des modèles mathématiques des générateurs photovoltaïques et leur modélisation ensuite on a fait quelque simulation dans différente condition de température et ensoleillement.

Nous sommes ensuite passé à la modélisation du système de pompage à savoir moteur asynchrone monophasé, onduleur monophasé, système de stockage batterie, pompe centrifuge, enfin on a effectué des simulations sur le système complet avec les mêmes conditions relevé en expérimentale

Le dernier chapitre, nous l'avons consacré aux différents résultats pratique acquis durant les testes effectués.

Ce travail a montré le fonctionnement d'une installation du pompage photovoltaïque et ces performances dans différent condition climatique.

Nous suggérons dans l'avenir d'amélioré les performances du système étudié en appliquant des commande de maximisation de puissance.

### *Liste des notations et symboles*

PV : Photovoltaïque.

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

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

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

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

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

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

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

$\Delta I_{pv}$  : Variation du courant (A).

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

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

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

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

$\Delta V_{pv}$  : Variation de la tension (V).

$\alpha$  : Coefficient d'incrémentation du courant  $I_{cc}$ .

$\beta_{oc}$  : Coefficient d'incrémentation de la tension.

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

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

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

$P_i$  : Paramètres constants.

$C_i$  : Paramètres constants.

$n_s$  : nombre de cellules connectées en série.

$R_s$  : Résistance série ( $\Omega$ ).

$R_{sh}$  : Résistance shunt ( $\Omega$ ).

## Notations et symboles

---

$K_1, K_2, K_3, K_4$  et  $m$  : Paramètres du modèle simplifié à une diode.

Noct : La température nominale de fonctionnement de la cellule solaire.

$T_a$  : Température ambiante ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_j$  : Température de la jonction ( $^{\circ}\text{C}$ ).

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

$\Delta T_j$  : Variation de la température ( $^{\circ}\text{C}$ ).

STC : Conditions standard test météorologiques.

$E_s$  : Ensoleillement ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

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

$S$  : La surface effective des cellules.

$N_{pv}$  : Nombre du panneau photovoltaïque.

$P_{mpp}$  : Le point de puissance maximal.

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

$P_{pv}$  : Puissance du champ photovoltaïque (W).

$P_{pv}(\text{unitaire})$  : Puissance d'un module photovoltaïque (W).

$V$  : Le volume d'eau ( $\text{m}^3$  ou l)

$T$  : Le temps en seconde(s) ou en heure (h).

$P$  : La puissance électrique (W).

$N_s$  : Est le nombre de panneaux en série.

$N_p$  : Est le nombre de panneaux en parallèle.

$\rho$  : La masse volumique de l'eau.

$g$  : La gravité

$Q$  : Le débit de l'eau pompé en (l/h) ou ( $\text{m}^3/\text{h}$ ),

$\eta$  : Le rendement.

$\eta_{pv}$  : Rendement des panneaux photovoltaïques.

$\eta_{pomp}$  : Rendement de la pompe.

$N_s$  : La vitesse de rotation synchronisme (tr/min).

$N_r$  : La vitesse de rotation rotorique (tr/min).

## Notations et symboles

---

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

$p$  : Nombre de paire de pole.

$g$  : Glissement.

$E.P$  : force magnétomotrice primaire.

$E.A$  : force magnétomotrice secondaire.

$C$  : condensateur de démarrage.

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

$f$  : coefficient de frottement visqueux.

$C_r$  : Couple de charge (N.m).

$C_{em}$  : Couple électromagnétique (N.m)

DC : Courant continu (direct courant).

AC : Courant alternatif (alternatif courant).

$E$  : Tension Continue.

$K_i$  : Transistor de puissance.

$V_s$  : Tension de sortie onduleur alternatif monophasé.

$D_i$  : Diode de roue libre.

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

$P_{per}$  : Pertes de charge produites par le frottement d'eau sur les parois des conduites.

$N_s$  : Le niveau statique.

$d_c$  : diamètre des canalisations.

$N_d$  : Le niveau dynamique.

$R_m$  : Rabbatement.

HMT : Hauteur manométrique total (mètre).

$V_{bat}$  : Tension de batterie.

$I_{bat}$  : Courant de la batterie.

$E_b$  : La force électromotrice fonction de l'état de charge de la batterie.

$R_b$  : La résistance interne, variable en fonction de l'état de charge.



## Notations et symboles

---

$M_{\alpha}$  : Inductance magnétique de l'enroulement principale.

$M_{\beta}$  : Inductance magnétique de l'enroulement auxiliaire.

$L_{r\alpha}$  : Inductance rotorique ramenée au nombre de spire de l'enroulement principale.

$L_{r\beta}$  : Inductance rotorique ramenée au nombre de spire de l'enroulement auxiliaire.

$V_{fp}$  : La chute de tension dans l'impédance  $Z_d$  de la phase principale.

$V_{bp}$  : La chute de tension dans l'impédance  $Z_i$  de la phase principale.

$V_{fa}$  : La chute de tension dans l'impédance  $Z_{da}$  de la phase auxiliaire.

$V_{ba}$  : La chute de tension dans l'impédance  $Z_{ia}$  de la phase auxiliaire

$P$  : Transformée de Laplace.

$L_s, L_r$  : Inductances propre statoriques et rotoriques la machine asynchrone (Henry)

# Annexe

## Annexe

### Panneau photovoltaïque STP080S-12BP.



### Electrical Characteristics

Model	STP080S-12/Bb
Open-circuit voltage (Voc)	21.9V
Optimum operating voltage (Vmp)	17.5V
Short-circuit current (Isc)	4.95A
Optimum operating current (Imp)	4.58A
Maximum power at STC (Pmax)	80Wp
Operating temperature	-40°C to +85°C
Maximum system voltage	715V DC

STC: Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, Module temperature 25°C, AM=1.5

### Paramètres

### SUNTECH STPO80S-12/Bb

C<sub>1</sub>

2.14\*10<sup>-6</sup>

C<sub>2</sub>

0.0766

## Onduleur de tension Steca.



### INVERSORES

### SOLARIX SINUS



#### CARACTERÍSTICAS:

- Inversor senoidal de 550W.
- Con regulador fotovoltaico integrado.
- Alta capacidad de sobrecarga.
- Protección óptima de la batería.
- Detección automática de consumidor en modo standby.

#### PROTECCIÓN ELECTRÓNICA:

- Descarga profunda de la batería.
- Desconexión por sobretensión en la batería.
- Sobretemperatura y sobrecarga.
- Protección contra cortocircuitos.
- Polaridad invertida, por medio de fusible interno.

ÚLTIMAS  
UNIDADES  
EN STOCK

DESCRIPCIÓN (datos técnicos a 25°C / 77°F)	550 RI
Tensión nominal de entrada	12 V
Rango de tensión de entrada	10,5 - 16V
Corriente máx. de cortocircuito de los módulos <sup>1</sup>	25 A
Corriente máx. de carga de corriente directa <sup>1</sup>	15 A
Tensión de salida	230 V +/-10 % (onda senoidal pura)
Frecuencia de salida	50 Hz +/-0,5 % opcional 60 Hz
Potencia continua	550 W
Eficiencia máxima (%)	91,5
Consumo propio	430 mA / 50 mA / 15 mA (encendido / standby / apagado)
Conexión CC / CA	bloque de bornes de 16 mm <sup>2</sup> integrado / enchufe de corriente alterna estándar con cable incluido
Temperatura de trabajo	-15 °C to +45 °C
Tipo de protección	IP 20
Peso	5,5 kg
Dimensiones L x A x A	312 x 245 x 114 mm
Garantía	2 años

<sup>1</sup> Sólo las versiones RI (con Regulador Fotovoltaico incluido)

Datos sujetos a modificaciones del fabricante.

\*En stock. Resto de productos disponibles bajo pedido.

ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS Y MEDIO AMBIENTE S.L.  
e-mail: info@aemaenergia.es web: www.aemaenergia.es



## Annexe

### Plaque signalétique du groupe motopompe.



### Plaque signalétique du moteur asynchrone monophasé :

### Paramètre de simulation pour le moteur asynchrone monophasé :

Paramètres	Valeurs
Résistance statorique	2.02
Résistance rotorique	4.12
Inductance auxiliaire	0.00114
Inductance statorique	0.00854
Resistance auxiliaire	0.00854
Inductance rotorique	50

## Annexe

---

Inductance mutuelle	0.00313
Coefficient de frottement	$10^{-6}$
Moment d'inertie	0.0018
Nombre de pole	1

### Plaque signalétique de la batterie (SOLAR ENERGY.StECO 5000) :

paramètre	Valeur
Capacité	190Ah(C100)
Tension	12v