

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ÉCOLE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES

- ANNABA -



المدرسة العليا للتكنولوجيا الصناعية

- عنابة -

Année 2020

DEPARTEMENT DU SECOND CYCLE

FILIERE

ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État

**ÉTUDE ET SIMULATION D'UN SYSTÈME DE POMPAGE SOLAIRE  
PHOTOVOLTAÏQUE**

Spécialité

Production Electrique et Energie Renouvelables

Par

BILAMI Wassim Salah Eddine

DIB Abdessalem

Sous la direction de :

DJELLAD Abdelhak

Grade

MAB

Établissement d'affiliation

ESTI Annaba

Devant le jury

Président :

ESTI Annaba

Examineurs :

ESTI Annaba

ESTI Annaba

## ***Dédicaces***

*Je dédie ce modeste travail :*

*Au cœur qui m'a réchauffé avec son âme : à  
toi Maman*

*A celui qui a combattu toute sa vie pour me  
procurer tous ce que je veux : à Mon Père*

*A mon frère, mes sœurs*

*A tous mes amis sans exception*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour  
la réalisation de ce travail.*

*Bilami Wassim Salah Eddine*

## ***Dédicaces***

*Je dédie ce modeste travail à  
À ma chère mère  
source de tendresse, qui m'encourage  
toujours.*

*A mon cher frère Mohamed Imed.*

*A ma chère grande mère.*

*A mon collègue Bilami Wassim de sa grande  
motivation et détermination.*

*Et à tous ceux qui travaillent pour une  
Algérie meilleure.*

*D98 Abdessalem*

# ***Remerciements***

*Nous tenons à remercier avant tous **LE BON DIEU** de nous avoir donné le courage et la patience pour terminer ce travail.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance et notre gratitude à notre encadreur Mr. Abdelhak DJELLAD qui a proposé et dirigé ce travail.*

*Nos remerciements vont aussi aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail.*

*Nous remercions également tous les enseignants du département du second cycle.*

*Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à notre formation et à l'élaboration de ce projet de fin d'étude.*

*Ceux que nous n'avons pas cités, trouvent ici l'expression de notre sincère reconnaissance.*

## *Table des matières*

**Introduction générale..... 1**

### *Chapitre I*

#### *État de l'art sur le pompage solaire photovoltaïque*

1.1 Introduction..... 3

1.2 Généralités sur le système photovoltaïque ..... 3

    1.2.1 Carte d'ensoleillement d'Algérie ..... 3

    1.2.2 Energie solaire ..... 4

        1.2.2.1 Energie solaire thermique ..... 4

        1.2.2.2 Energie solaire photovoltaïque ..... 5

    1.2.3 Rayonnement solaire..... 6

    1.2.4 Constitution d'énergie photovoltaïque..... 7

        1.2.4.1 Cellule photovoltaïque..... 7

            1.2.4.1.1 Technologie des cellules photovoltaïques..... 7

        1.2.4.2 Module photovoltaïque ..... 8

        1.2.4.3 Panneau photovoltaïque..... 9

        1.2.4.4 Centrale photovoltaïque..... 9

    1.2.5 Principe de fonctionnement ..... 10

    1.2.6 Angle d'inclinaison ..... 11

1.3 Généralités sur le système de pompage..... 11

    1.3.1 Système de pompage photovoltaïque..... 11

    1.3.2 Quantité d'eau souterraine en Algérie ..... 12

    1.3.3 Importance du pompage solaire pour l'Algérie ..... 13

1.4 Conclusion..... 14

## **Chapitre II**

### **Modélisation du système de pompage solaire photovoltaïque**

2.1 Introduction.....	15
2.2 Modélisation du système solaire photovoltaïque .....	15
2.2.1 Circuit équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque .....	15
2.2.1.1 Cas d'une cellule idéale .....	15
2.2.1.2 Cas d'une cellule réelle .....	16
2.2.2 Générateur photovoltaïque .....	18
2.2.2.1 Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque .....	18
2.2.2.2 Association en parallèle .....	19
2.2.2.3 Association en série .....	20
2.2.2.4 Association mixte (série-parallèle) .....	21
2.2.3 Influence des paramètres .....	23
2.2.3.1 Influence de l'éclairement.....	23
2.2.3.2 Influence de la température.....	24
2.2.3.3 Influence de la résistance série.....	24
2.3 Modélisation du groupe moteur pompe .....	25
2.3.1 Moteur électrique.....	25
2.3.1.1 Moteurs asynchrones .....	25
2.3.1.2 Moteur DC à aimant permanent.....	26
2.3.1.3 Modélisation du moteur DC a aimant permanent .....	27
2.3.2 Pompes à eau .....	28
3.3.2.1 Pompe centrifuge.....	28
2.3.2.2 Pompe volumétrique .....	30
2.3.2.3 Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique	31
2.3.2.4 Modélisation e la pompe de type centrifuge .....	31
2.4 Conclusion .....	32

### ***Chapitre III***

#### ***Simulation du Système de pompage solaire photovoltaïque***

3.1 Introduction.....	33
3.2 Etage d’adaptation DC/DC à la charge .....	33
3.2.1 Convertisseur DC-DC.....	34
3.2.1.1 Principe du convertisseur Boost .....	34
3.2.1.2 Avantages du convertisseur « BOOST » .....	36
3.3 Commande MPPT .....	36
3.3.1 Principe de la commande MPPT .....	37
3.3.2 Algorithme perturbation et observation (PO) .....	37
3.4 Commande de l’étage d’adaptation par la technique MLI .....	40
3.5 Simulation du système complet de pompage solaire photovoltaïque .....	41
3.5.1 Résultats de simulation .....	41
A. Simulation du convertisseur BOOST .....	41
B. Simulation de la commande MPPT (P&O).....	43
C. Simulation du système complet .....	45
3.6 Conclusion .....	50

### ***Chapitre IV***

#### ***Dimensionnement d’un système de pompage solaire photovoltaïque***

4.1 Introduction .....	51
4.2 Méthode de dimensionnement .....	51
4.3 Evaluation des besoins en eau .....	51
4.4 Donnée de base .....	51
4.4.1 Le débit .....	51
4.4.2 La hauteur manométrique totale .....	52
4.5 Calcul de l’énergie journalière requise .....	53
4.6 Choix des composants du système .....	55
4.6.1 Dimensionnement de la pompe centrifuge .....	55

4.6.2 Dimensionnement du moteur .....	55
4.6.3 Dimensionnement du champ photovoltaïque .....	55
4.6.4 Dimensionnement de la batterie .....	56
4.6.5 Régulateur solaire à MPPT .....	57
4.6.6 Canalisations .....	58
4.7 Résultats du dimensionnement .....	59
4.8 Conclusion .....	59
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>60</b>

## *Liste des figures*

### *Chapitre I*

<b>Figure 1.1</b> Carte préliminaire des irradiations solaire de l'Algérie .....	4
<b>Figure 1.2</b> Energie thermique .....	5
<b>Figure 1.3</b> Applications d'énergie solaire photovoltaïque .....	5
<b>Figure 1.4</b> Rayonnement solaire .....	6
<b>Figure 1.5</b> Cellule mono-cristalline .....	7
<b>Figure 1.6</b> Cellule poly-cristalline .....	8
<b>Figure 1.7</b> Cellule amorphe .....	8
<b>Figure 1.8</b> Module photovoltaïque.....	9
<b>Figure 1.9</b> Panneaux photovoltaïques .....	9
<b>Figure 1.10</b> Centrales photovoltaïques.....	10
<b>Figure 1.11</b> Principe de fonctionnement .....	10
<b>Figure 1.12</b> Angle d'inclinaison .....	11
<b>Figure 1.13</b> Quantité d'eau souterraine en Algérie .....	12
<b>Figure 1.14</b> Pompage solaire photovoltaïque au sud algérien .....	13
<b>Figure 1.15</b> Pompage solaire dans l'agriculture .....	14

### *Chapitre II*

<b>Figure 2.1</b> Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque idéale .....	15
<b>Figure 2.2</b> Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque réelle .....	17
<b>Figure 2.3</b> Générateur photovoltaïque .....	18

<b>Figure 2.4</b>	Caractéristiques I(V) et P(V) d'un module photovoltaïque.....	19
<b>Figure 2.5</b>	Association en parallèle.....	20
<b>Figure 2.6</b>	Caractéristiques I(V) et P(V) résultantes d'un groupement en parallèle.....	20
<b>Figure 2.7</b>	Association en série.....	21
<b>Figure 2.8</b>	Caractéristiques I(V) et P(V) résultantes d'un groupement en série.....	21
<b>Figure 2.9</b>	Association mixte (série-parallèle) .....	22
<b>Figure 2.10</b>	Caractéristiques I(V) et P(V) résultantes d'un groupement mixte .....	22
<b>Figure 2.11</b>	Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et P(V) .....	23
<b>Figure 2.12</b>	Influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V) .....	24
<b>Figure 2.13</b>	Influence de la résistance série sur les caractéristiques I(V) et P(V) .....	25
<b>Figure 2.14</b>	Machine asynchrone.....	26
<b>Figure 2.15</b>	Structure du Moteur à aimant permanent .....	27
<b>Figure 2.16</b>	Modèle électrique de l'induit du moteur à aimant permanent .....	28
<b>Figure 2.17</b>	Pompe centrifuge.....	29
<b>Figure 2.18</b>	Courbes des caractéristiques des pompes centrifuges .....	29
<b>Figure 2.19</b>	Pompe volumétrique.....	30
<b>Figure 2.20</b>	Courbes des caractéristiques de la pompe volumétrique.....	30

### *Chapitre III*

<b>Figure 3.1</b>	Étage d'adaptation entre un GPV et une charge .....	33
<b>Figure 3.2</b>	Circuit électrique du convertisseur Boost.....	35
<b>Figure 3.3</b>	Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost .....	36
<b>Figure 3.4</b>	Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O.....	37
<b>Figure 3.5</b>	Organigramme de la méthode P&O .....	39
<b>Figure 3.6</b>	La porteuse et le signal de commande du hacheur Boost.....	40
<b>Figure 3.7</b>	Organigramme du système de pompage solaire .....	41
<b>Figure 3.8</b>	Modèle du convertisseur BOOST .....	41
<b>Figure 3.9</b>	Schéma bloc du convertisseur BOOST .....	42
<b>Figure 3.10</b>	Schéma bloc de la commande MLI .....	42
<b>Figure 3.11</b>	Tension de sortie du hacheur (Boost).....	42

<b>Figure 3.12</b> Courant de sortie du hacheur (Boost).....	43
<b>Figure 3.13</b> Schéma bloc Commande MPPT (P&O).....	43
<b>Figure 3.14</b> Tension avant la commande MPPT.....	44
<b>Figure 3.15</b> Tension après la commande MPPT.....	44
<b>Figure 3.16</b> Schéma bloc du système complet.....	45
<b>Figure 3.17</b> Schéma bloc du moteur PMDC .....	46
<b>Figure 3.18</b> Courant et couple de charge du moteur PMDC .....	46
<b>Figure 3.19</b> Puissance du PV .....	47
<b>Figure 3.20</b> Vitesse du moteur PMDC.....	47
<b>Figure 3.21</b> Schéma bloc d'un système de pompage d'eau .....	48
<b>Figure 3.22</b> Pompe Centrifuge.....	49
<b>Figure 3.23</b> Différentes pressions aux nœuds du système de pompage.....	49
<b>Figure 3.24</b> Volumes d'eau dans chaque réservoir (en m <sup>3</sup> ) .....	49

## *Chapitre IV*

<b>Figure 4.1</b> Hauteur manométrique total. ....	53
<b>Figure 4.2</b> organigramme de la balance de l'énergie électrique et l'énergie hydraulique .	54
<b>Figure 4.3</b> panneau solaire de 150Wc.....	56
<b>Figure 4.4</b> Batterie solaire a GEL 260AH/12V_ .....	57
<b>Figure 4.5</b> Régulateur MPPT 85A 250V.....	57
<b>Figure 4.6</b> Tuyau d'alimentation Ø20mm.....	58

*Liste des tableaux*

<b>Tableau 1.1</b> Différent types des cellules photovoltaïques .....	08
<b>Tableau 2.1</b> Paramètres de caractérisation. ....	18
<b>Tableau 2.2</b> Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique.....	31
<b>Tableau 3.1</b> Données expérimentales du module photovoltaïque BP SX150s .....	46
<b>Tableau 4.1</b> Données de base.....	58
<b>Tableau 4.1</b> Tableau des résultats.....	59

## *Liste des symboles*

<b>I</b>	Courant fourni par la cellule en [A].
<b>V</b>	Tension à la borne de la cellule en [V].
<b>I<sub>ph</sub></b>	Photo-courant en [A].
<b>I<sub>s</sub></b>	Courant de saturation de la diode en [A].
<b>V<sub>t</sub></b>	Potentiel thermique.
<b>I<sub>cc</sub></b>	Courant de court-circuit en [A].
<b>V<sub>co</sub></b>	Tension de circuit ouvert en [V].
<b>q</b>	Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ [Coulomb].
<b>k</b>	Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ [Coulomb].
<b>T</b>	Température effective de la cellule [Kelvin].
<b>I<sub>d</sub></b>	Courant de la diode en [A].
<b>V<sub>PV</sub></b>	Tension du panneau photovoltaïque[V].
<b>R<sub>s</sub></b>	Résistance série en [ $\Omega$ ].
<b>R<sub>sh</sub></b>	Résistance shunt (ou parallèle) en [ $\Omega$ ].
<b>I<sub>sh</sub></b>	Courant shunt en [A].
<b>G</b>	L'ensoleillement.
<b>N<sub>s</sub></b>	Nombre des modules en séries.
<b>N<sub>p</sub></b>	Nombre des modules en parallèle.
<b>V<sub>PCO</sub></b>	Tension en parallèle de circuit ouvert en [V].
<b>I<sub>PCC</sub></b>	Courant en parallèle de court-circuit en [A].
<b>V<sub>MCO</sub></b>	Tension mixte de circuit ouvert en [V].
<b>I<sub>MCC</sub></b>	Courant mixte de court-circuit en [A].
<b><math>\alpha</math> (T)</b>	Coefficient de la température [A/W].
<b>S</b>	Surface de la cellule [m <sup>2</sup> ].
<b>K<sub>e</sub></b>	Coefficient de la tension.
<b>K<sub>c</sub></b>	Coefficient du couple moteur.
<b>I<sub>a</sub></b>	Courant d'induit du moteur en [A].
<b>R<sub>a</sub></b>	Résistance de l'induit du moteur en [ $\Omega$ ].
<b>C<sub>e</sub></b>	Couple électromagnétique du moteur en [N.m].

---

$C_r$	Couple de charge en [N.m].
$\omega$	Vitesse de l'arbre du moteur en [tr/min].
$J$	Moment d'inertie en [kg.m <sup>2</sup> ].
$P_h$	Puissance communiquée au fluide par la pompe (W).
$P_{ele}$	Puissance électrique du moteur PMDC en (W).
$\eta_{mp}$	Rendement du groupe motopompe (%).
$g$	Accélération de la pesanteur (9.81 m/s <sup>2</sup> ).
$\rho$	Masse volumique de l'eau (1000 Kg/m <sup>3</sup> ).
$Q$	Débit volumique (m <sup>3</sup> /s).
$\Omega$	Vitesse du moteur PMDC en (rad/s)
$P_n$	Puissance nominale du moteur (W).
$\Omega_n$	Vitesse nominale du moteur (rad/s).
$\alpha$	Rapport cyclique de commutation.
$V_e$	Tension d'entrée (tension du générateur photovoltaïque dans notre cas) en [V].
$V_s$	Tension de sortie aux bornes du hacheur en [V].
$P_{max}$	Puissance maximale (W).
$H_g$	Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée et le plan d'utilisation.
$P_C$	Pertes moyennes des charges.
$J_r$	Perte de charges dans les conduites de refoulement.
$H_a$	Hauteur d'aspiration.
$H_r$	Hauteur de refoulement.
$C_h$	Constante hydraulique.
$E_{ele}$	Energie électrique requise pour la pompe
$N_j$	Nombre de jour d'autonomie de la batterie
<b>PDD</b>	Profondeur de décharge de la batterie.
$\eta_{batt}$	Rendement de la batterie (%).
$U_{batt}$	Tension de la batterie en [V].
$N_{batt}$	Nombre de batterie.
$C_{batt,u}$	Capacité unitaire de la batterie en (Ah).
$\Delta V$	Différence de tension en [V].
$N_{pv}$	Nombre des panneaux photovoltaïques.
$V_{pvtot}$	Tension totale à la sortie du générateur photovoltaïque en [V].
$I_{pvtot}$	Courant total à la sortie du générateur photovoltaïque en [A].
$P_C$	Puissance crête du champ photovoltaïque (W).

## *Abréviations*

<b>DC/DC</b>	Convertisseur continu –continu.
<b>GPV</b>	Générateur photovoltaïque.
<b>PV</b>	Panneau photovoltaïque.
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking (Suivi du point de puissance maximum).
<b>PPM</b>	Point de puissance maximum.
<b>P&amp;O</b>	Les algorithmes de perturbation et d'observation.
<b>MLI</b>	Modulation de largeur d'impulsions.
<b>PI</b>	Régulation proportionnelle-intégrale.
<b>HMT</b>	Hauteur manométrique totale que doit convaincre la pompe (m).
<b>PMDC</b>	Permanent Magnet DC Motor.

# *Introduction générale*

## **Introduction générale**

Les énergies naturelles telles que le soleil, le bois, l'eau, le vent et la chaleur de la terre, également appelées énergies renouvelables, assurent le développement des êtres humains. L'eau et le soleil sont des éléments essentiels de notre vie quotidienne. Ils sont particulièrement importants dans les régions reculées, désertiques ou montagneuses comme le sud de l'Algérie. Par conséquent, l'augmentation de la demande en eau dans ces zones est une question de développement durable.

L'Algérie a fait tout son possible pour assurer l'approvisionnement en eau de toutes les régions du nord par la construction de nouveaux barrages et des stations de pompage d'eau au sud. Les immenses ressources en eaux souterraines et les terres inexploitées de l'Algérie nécessitent l'utilisation de l'électricité, et l'électricité elle-même est presque indisponible dans tout le Sahara.

Aujourd'hui, l'exploitation de l'énergie photovoltaïque offre un approvisionnement en énergie inépuisable mais surtout une énergie propre et non polluante, ce qui constitue un avantage certain. [1]

Depuis sa première installation à la fin des années 1970, le système de pompage photovoltaïque occupe une part importante des projets d'application énergétique photovoltaïque, ils sont aujourd'hui parmi les applications les plus importantes.

Il existe essentiellement deux façons pour les pompes photovoltaïques. Que ce soit avec ou sans Batterie. Le premier utilise des Batteries pour stocker l'énergie électrique générée par le module photovoltaïque et le second sans batterie à l'aide de réservoirs d'eau pour stocker l'eau jusqu'à ce qu'il soit près pour l'utilisation [1].

Dans ce contexte général, notre étude sera portée sur l'étude et la simulation d'un système de pompage solaire photovoltaïque. Notre travail est structuré en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente une approche générale sur l'énergie photovoltaïque avec une description sur le système de pompage d'eau.
- Le deuxième chapitre est consacré sur la modélisation du système solaire photovoltaïque et du groupe moteur pompe.

- Le troisième chapitre, est basé sur la commande MPPT (étage d'adaptation) et les résultats de simulation du système complet de pompage solaire photovoltaïque.
- Le dernier chapitre, présente une méthode de dimensionnement basé sur les besoins d'eau d'une résidence.

# *Chapitre I*

*État de l'art sur l'énergie  
solaire photovoltaïque*

## **1.1 Introduction**

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. [1]

Découvert en 1839 par Antoine Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu. [2]

L'énergie solaire est aujourd'hui utilisée pour produire de l'électricité (à des fins industrielles ou domestiques), pour chauffer les habitations ou encore pour dessaler l'eau de mer. L'un des grandes utilisations d'énergie solaire est dans le domaine d'agriculture, on parle du pompage solaire. [2]

Les systèmes de pompage solaire photovoltaïque utilisent la conversion du rayonnement solaire en électricité pour alimenter une pompe dans un forage ou un puits permettant d'assurer l'exhaure de l'eau. L'objectif est de garantir l'accès à l'eau, en tous lieux, même les plus éloignés des grands cours d'eau ainsi qu'aux communautés les plus isolées. [3]

Ce chapitre présente des généralités et des notions de base sur l'énergie solaire photovoltaïque ainsi que le pompage solaire.

## **1.2 Généralités sur le système photovoltaïque**

### **1.2.1 Carte d'ensoleillement en Algérie**

La situation géographique de l'Algérie dispose des gisements solaires les plus importants dans le monde. La durée d'ensoleillement sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3500 heures aux hauts plateaux et Sahara. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 KWh

sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2250KWh/m<sup>2</sup>/an au sud du pays. [4]

D'après la carte irradiations solaire de l'Algérie (voir figure 1.1), on observe que la zone de Tamanrasset a un ensoleillement important.

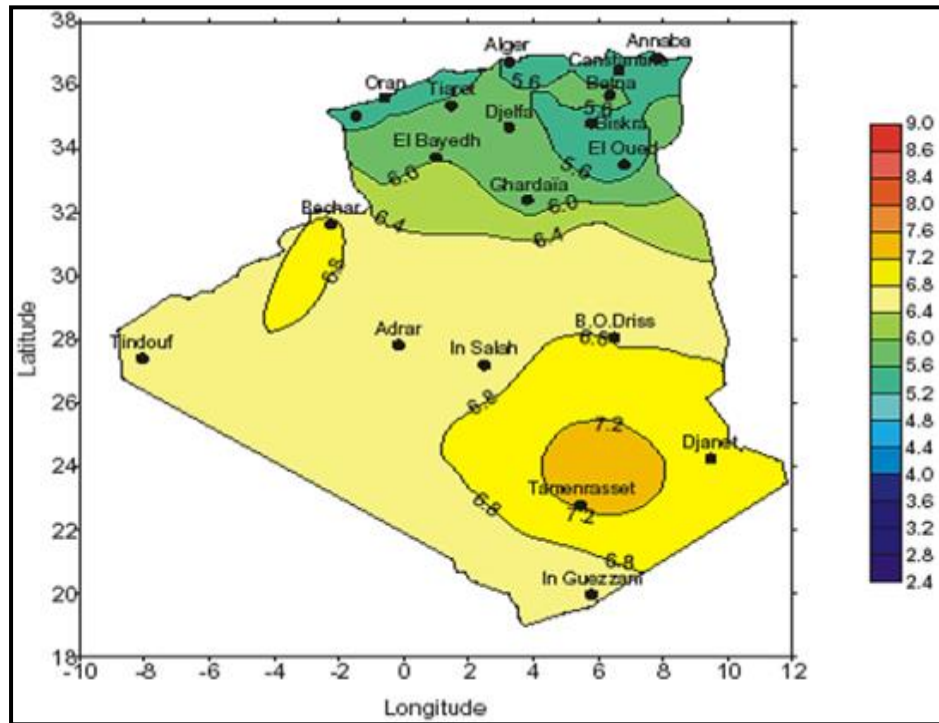


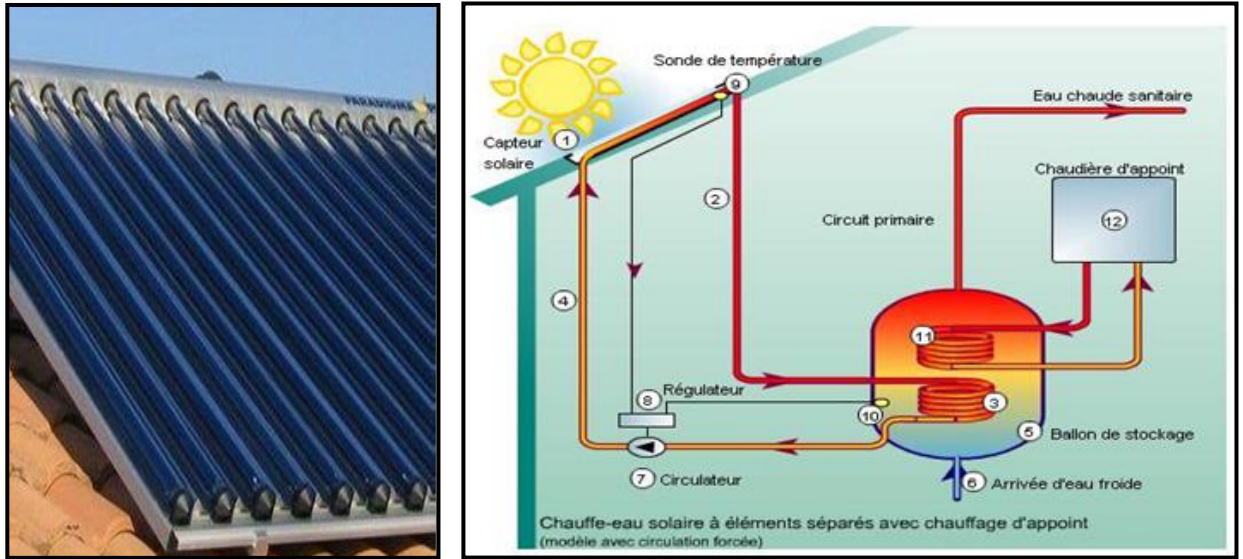
Figure 1.1 Carte préliminaire des irradiations solaires de l'Algérie [5]

## 1.2.2 Energie solaire

C'est l'énergie produite dans toutes les directions par le soleil grâce au rayonnement solaire. Il existe principalement deux façons d'utiliser directement l'énergie solaire :

### 1.2.2.1 Energie solaire thermique

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique (Figure 1.2) grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil, cette forme de conversion d'énergie peut être directe si on veut uniquement chauffer de l'eau pour les différentes applications (chauffe-eau et chauffage solaires). [5]



a) Module thermique

b) Principe de fonctionnement de l'énergie thermique

Figure 1.2 Energie thermique [5]

### 1.2.2.2 Energie solaire photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules solaires généralement à base de silicium. L'énergie électrique produite est un courant continu qui peut être utilisé pour alimenter un appareil, recharger une batterie, alimenter un réseau de distribution électrique ou répondre à un besoin local. [5]



Figure 1.3 Applications d'énergie solaire photovoltaïque

### 1.2.3 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ( $0.2\mu\text{m}$ ) à l'infrarouge ( $2.5\mu\text{m}$ ). L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de  $1350\text{W}/\text{m}^2$  dans l'espace hors atmosphère terrestre [6].

- **Rayonnement solaire direct** : définit comme étant le rayonnement provenant seul du disque solaire, Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages [7].
- **Rayonnement solaire diffus** : correspondant au rayonnement dispersé dans l'atmosphère par la brume et les nuages. Le rayonnement solaire diffus n'est donc nul que la nuit [7].
- **Rayonnement solaire réfléchi** : Ou l'albédo du sol, le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige) [8].
- **Rayonnement solaire global** : la somme des trois types de rayonnements direct et diffus et dont l'intensité est variable d'un endroit à un autre et d'une heure à l'autre [7].

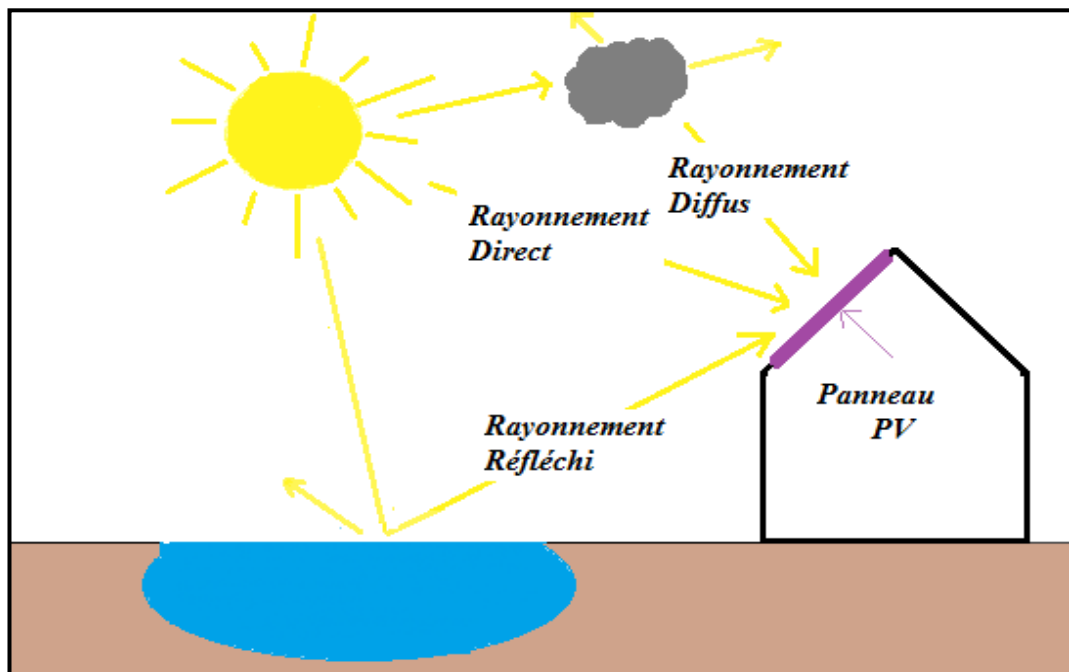


Figure 1.4 Rayonnement solaire

## 1.2.4 Constitution d'énergie photovoltaïque

Un système PV implique un capteur et la présence de plusieurs éléments qui composent ce système : les cellules solaires, les batteries, le régulateur de charge, le convertisseur CC/CA.

Les progrès des techniques de production de cellules solaires d'étendre et d'accélérer la production de l'énergie électrique, il est devenu très répandue dans diverses images: module sur une voiture solaire, panneau sur toit de maison, centrale dans les sites isolées...etc.

### 1.2.4.1 Cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est un capteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique. Cette cellule est l'unité de base du système photovoltaïque. Il se compose d'un matériau semi-conducteur, ce qui rend la plus petite composante du système photovoltaïque [9].

#### 1.2.4.1.1 Technologie des cellules photovoltaïques

Il existe trois grands types des cellules selon le type de silicium:

- *Cellule au silicium mono- cristallin* : les plus chères du marchés mais elles ont un taux de rendement de 12% à 20 %.

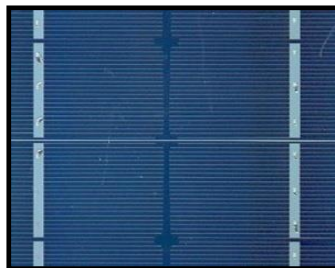
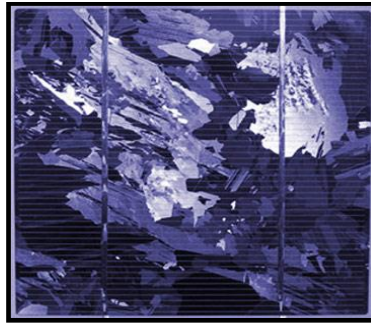


Figure 1.5 Cellule mono- cristalline

- *Cellule au silicium poly-cristallin* : elles sont plus chères que les cellules amorphes mais elles ont un taux de rendement supérieur, de 11% à 15 %.



**Figure 1.6** Cellule poly-cristalline

- *Cellule au silicium amorphe* : ce sont les moins chères mais le rendement ne peut dépasser les 10 %.



**Figure 1.7** Cellule amorphe

Le tableau suivant présente les différents types de cellules avec leurs rendements : [10]

**Tableau 1** : Différents types des cellules photovoltaïques

Technologie des cellules	Rendement en laboratoire	Rendement en production
Silicium amorphe	13%	5 – 9%
Silicium poly-cristallin	19,8%	11 – 15 %
Silicium mono- cristallin	24,7%	12 –20%

#### 1.2.4.2 Module photovoltaïque

Les modules photovoltaïques constitués par une association de certain nombre de cellules. Ces dernières sont connectées entre eux soit en séries ou en parallèle. La connexion en série des cellules permettent d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin. [11]



**Figure 1.8** Module photovoltaïque

### 1.2.4.3 Panneau photovoltaïque

Les panneaux solaires photovoltaïques qui sont composé d'un groupement de modules élémentaires associés en série et en parallèle suivant la puissance souhaitée.



**Figure 1.9** Panneaux photovoltaïques

### 1.2.4.4 Centrale photovoltaïque

Une centrale solaire photovoltaïque est un ensemble destiné à augmenter la quantité de production solaire d'électricité. Elle est constituée de panneaux solaires photovoltaïques reliés entre eux (série et parallèle) et utilise des onduleurs pour être raccordée au réseau.



Figure 1.10 Centrales photovoltaïques

### 1.2.5 Principe de fonctionnement

Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée. Le sens conventionnel du courant est dirigé de N vers P et correspond également au sens du champ électrique. [11]

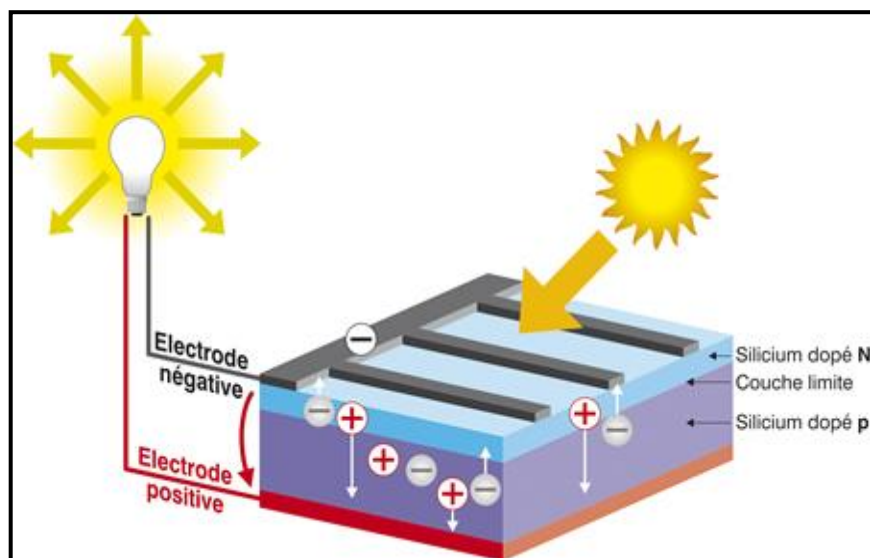


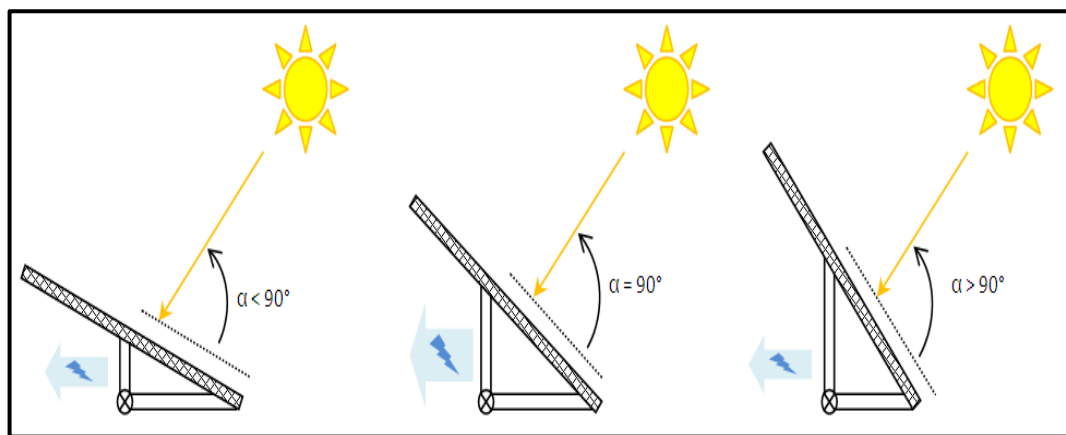
Figure 1.11 Principe de fonctionnement

### 1.2.6 Angle d'inclinaison

Le rendement des centrales solaires dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels l'angle d'incidence des rayons du soleil [12].

D'abord, l'angle incident varie au fil de la journée : s'il augmente progressivement depuis le lever du soleil jusqu'à midi, heure du zénith, il diminue à nouveau jusqu'au couchant.

Pour une production maximale il faut soit les rayons du soleil atteignent perpendiculaires à la surface du panneau. Qui est assurée soit manuellement, soit commandé par un circuit électronique (Commande MPPT).



**Figure 1.12** Angle d'inclinaison [12]

Inclinaison de  $90^\circ$  par rapport aux rayons du soleil (au centre) = production optimale

Lorsque les rayons du soleil n'atteignent pas le panneau sous l'angle optimal, le rendement est approximativement :  $\sin(\alpha)$  [13].

## 1.3 Généralités sur le système de pompage

### 1.3.1 Système de pompage photovoltaïque

Beaucoup de populations dans les zones rurales des pays en voie de développement affrontent de grands problèmes dus au déficit en eau. Ces problèmes sont spécialement accentués dans les zones désertiques. Le déficit en eau dans les zones arides est une question vitale pour les populations. L'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche des solutions adéquates à ce problème. [3]

Le pompage photovoltaïque est une technique particulière qui permet d'extraire l'eau du sous-sol grâce à l'énergie du soleil, c'est la solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent. [14]

### 1.3.2 Quantité d'eau souterraine en Algérie

Il y a 123 unités hydrogéologiques différentes est l'estimation de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) du potentiel des eaux souterraines exploitables disponibles. Le potentiel exploitable d'eau souterraine total disponible est estimé à environ 2.7 milliards de m<sup>3</sup> dans la région nord de l'Atlas et à 5 milliards de m<sup>3</sup> dans la région du sud du Sahara. [15]

En Algérie les prélèvements d'eau souterraine pour différentes utilisations ont plusieurs estimations. Le volume d'eau souterraine prélevé pour l'agriculture et l'industrie est examiné chaque année avec une incertitude considérable, car les données sont dispersées et souvent contradictoires.

Donc le nombre 4.3 milliards de m<sup>3</sup>/ans est l'estimation des prélèvements totaux d'eau souterraine de toutes les sources à travers le pays. Dans la région du nord de l'Atlas, le Plan National de l'Eau (Ministère des Ressources en Eau, en 2010) estime que 1.8 milliard de m<sup>3</sup> d'eau souterraine sont utilisés chaque année.

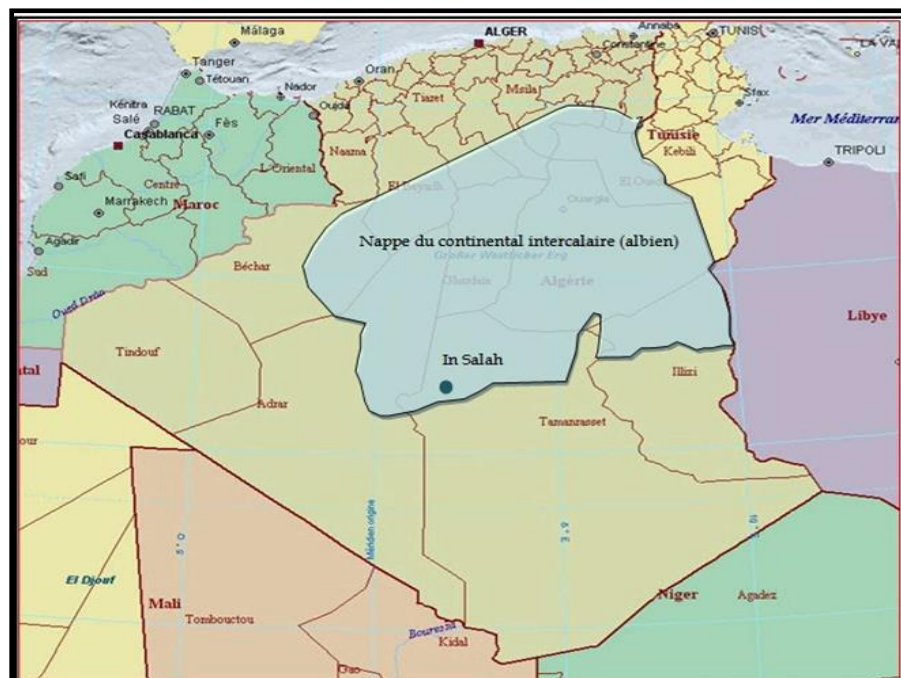


Figure 1.13 Quantité d'eau souterraine en Algérie

On estime que les eaux souterraines fournissent 63% de la demande totale en eau dans la région du Nord (Atlas) et 96% de la demande en eau dans la région du Sud (Sahara) [15].

Le plus grand utilisateur d'eau souterraine est l'irrigation avec plus de 69% de superficie équipée pour l'irrigation était destinée à être irriguée par les eaux souterraines [15]

### **1.3.3 Importance du pompage solaire pour l'Algérie**

L'Algérie est le plus grand pays d'Afrique, avec une influence régionale considérable. L'agriculture, soutenue par l'irrigation, ne représente qu'une petite partie de l'économie. La majorité de la population vit au nord, sur la côte méditerranéenne. Le désert saharien, qui couvre le sud du pays, est peu peuplé. Plus de 80% de la population rurale et urbaine ont accès à l'eau potable.

L'approvisionnement en eau dépend fortement des eaux souterraines pour la consommation, l'agriculture et l'industrie. L'agriculture dans le nord de l'Algérie repose sur l'irrigation en eaux souterraines, constituée d'aquifères côtiers relativement récents et peu profonds, qui sont activement rechargés par les précipitations. Au sud, les aquifères sédimentaires profonds qui ne sont pas activement rechargés contiennent d'immenses quantités d'eaux souterraines. [16]

C'est la raison pour laquelle le pompage solaire prend de plus en plus pied dans toutes les régions de notre pays. Ce système est particulièrement adapté dans les zones où les ressources en eau ne sont pas facilement disponibles ou accessibles, dans les zones agricoles, ou dans les zones les plus isolées ou inaccessibles du territoire où il n'est pas possible de construire des réseaux et des infrastructures adéquates. C'est un système très fiable, durable, et aussi respectueux de l'environnement. [16]



**Figure 1.14** Pompage solaire photovoltaïque au sud algérien



**Figure 1.15** Pompage solaire dans l'agriculture

## **1.4 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté premièrement des généralités sur le système photovoltaïque tel que leur constitution, principe de fonctionnement, les technologies de la cellule photovoltaïque,...etc.

Ensuite nous avons estimé les ressources d'eau en Algérie et l'importance du système de pompage photovoltaïque au niveau national.

# *Chapitre II*

*Modélisation du système  
de pompage solaire  
photovoltaïque*

## 2.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque est une possibilité de développement efficace et durable tant que le soleil brille encore, c'est pour cela que les recherches scientifiques se développent dans le sens d'améliorer et d'optimiser l'exploitation des systèmes solaires, l'optimisation des systèmes solaires est basée sur des critères de dimensionnement et de modélisation des systèmes photovoltaïque [17].

Le pompage de l'eau par l'énergie solaire est une solution à la demande croissante d'eau dans les zones rurales et sites isolés attrayante pour les régions bien ensoleillées de la planète.

La modélisation d'un système démarre par la mise en place des équations mathématiques qui régissent le système de la dynamique, où le modèle est une représentation mathématique d'une entité réelle, le but de ce chapitre est d'obtenir la modélisation du système solaire photovoltaïque et du groupe moteur pompe.

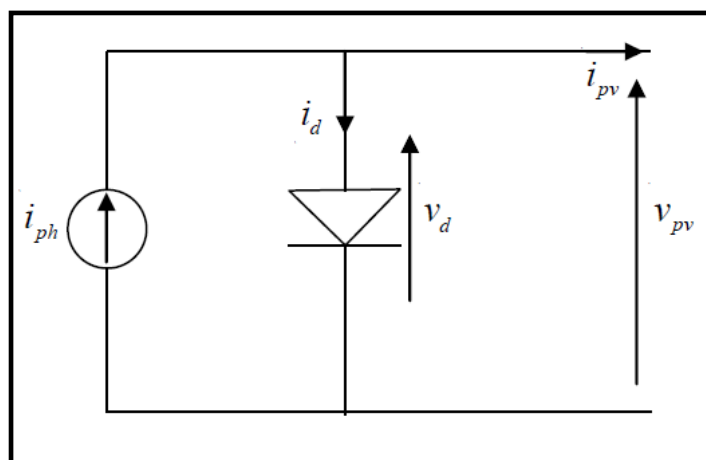
## 2.2 Modélisation du système solaire photovoltaïque

### 2.2.1 Circuit équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. On considère deux cas :

#### 2.2.1.1 Cas d'une cellule idéale

La cellule photovoltaïque idéale composée d'un générateur de courant et d'une diode en parallèle, ce dernier associé en série avec une résistance  $R_s$ . Le circuit équivalent illustré dans la figure suivante [18] :



**Figure 2.1** Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque idéale

Les équations retenues de ce modèle sont :

$$I_{Ph} = I + I_d \quad (2.1)$$

Le courant  $I_{PV}$  est assimilé au courant  $I_{CC}$  avec  $V_{PV} = 0$ , courant de court-circuit obtenu en courant circulant dans la charge.

$$I = I_{Ph} - I_d \quad (2.2)$$

$$I_d = I_S \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V_{co}}{k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

$$I_{Ph} = I_{CC} * \left(\frac{G}{1000}\right) \quad (2.4)$$

$$I = [I_{CC} * \left(\frac{G}{1000}\right)] - I_S \left[ \exp\left(\frac{q \cdot V_t}{k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

I : Courant fourni par la cellule en [A].

V : Tension au borne de la cellule en [V].

$I_{ph}$  : Photo-courant en [A].

$I_s$  : Courant de saturation de la diode en [A].

$V_t$ : Potentiel thermique.

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit en [A].

$V_{co}$  : Tension de circuit ouvert en [V].

q : Charge de l'électron =  $1,602 \cdot 10^{-19}$  [Coulomb].

k : Constante de Boltzmann =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  [J/K].

T : Température effective de la cellule [Kelvin].

### 2.2.1.2 Cas d'une cellule réelle

C'est le modèle le plus classique de la littérature il fait intervenir un générateur de courant  $I_{Ph}$  pour la modélisation d'un flux lumineux incident, une diode (D) caractérisant la jonction PN et deux résistances [18,19] :

- **Résistance série  $R_s$**  : La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière représentant les pertes par effet joule.
- **Résistance parallèle  $R_{sh}$**  : rend compte des effets, tels que le courant de fuite par les bords de la cellule, elle est réduite du fait de la pénétration des impuretés métalliques ans

la jonction. Elle est généralement très supérieure à ( $R_s$ ). On peut l'étudier à partir de circuit équivalent illustré dans la figure suivante:

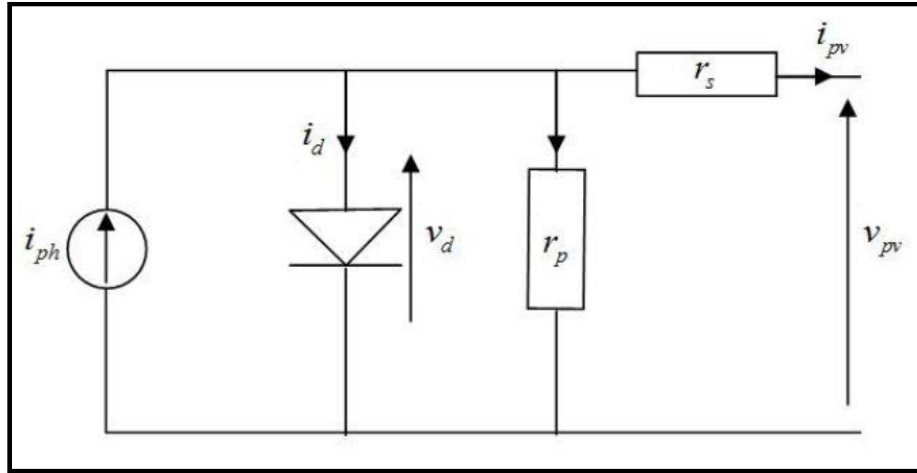


Figure 2.2 Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque réelle

$$I_{ph} = I_d + I_{sh} + I \tag{2.6}$$

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{2.7}$$

$$I_d = I_s \left[ \exp\left(\frac{q*V}{k*T}\right) - 1 \right] \tag{2.8}$$

$$I_s = \frac{I_{cc}}{\left(\exp\left(\frac{V_{co}}{N_{cell}*V_t}\right)\right)} \tag{2.9}$$

$$I_{sh} = \frac{V_{co} + I_{cc}*R_s}{R_{sh}} \tag{2.10}$$

$$I_{ph} = I_{cc} * \left(\frac{G}{1000}\right) \tag{2.11}$$

$$I = \left[ I_{cc} * \left(\frac{G}{1000}\right) \right] - I_s \left[ \exp\left(\frac{q*V + I*R_s}{k*T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + I*R_s}{R_{sh}}\right) \tag{2.12}$$

$R_s$  : Résistance série en [ $\Omega$ ].

$R_{sh}$  : Résistance shunt (ou parallèle) en [ $\Omega$ ].

$I_{sh}$ : Courant shunt en [A].

$G$  : L'ensoleillement.

### 2.2.2 Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un ensemble des modules rangés sous forme de panneaux, mis en place pour obtenir une puissance, un courant  $I_{CC}$  et une tension  $V_{CO}$  désirées.

La structure topologique du générateur est composée d'un nombre de modules séries  $N_s$  et d'un nombre de modules parallèles  $N_p$ .

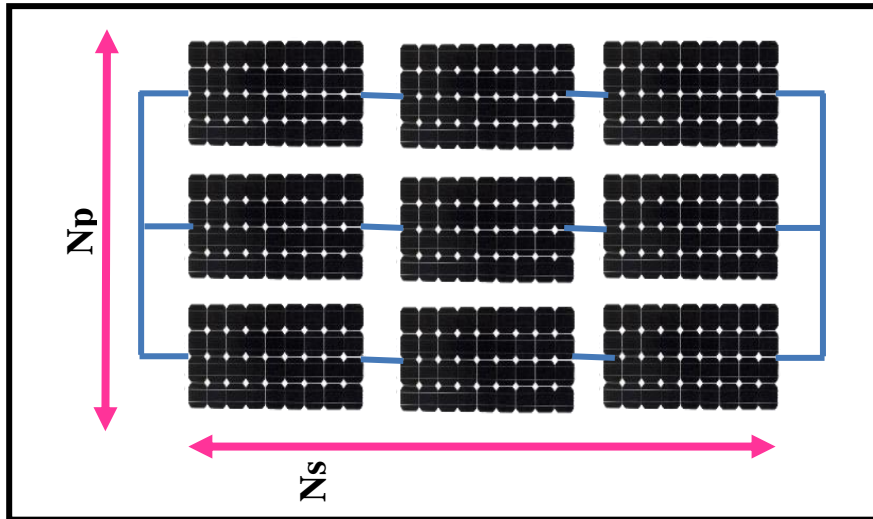


Figure 2.3 Générateur photovoltaïque

#### 2.2.2.1 Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque

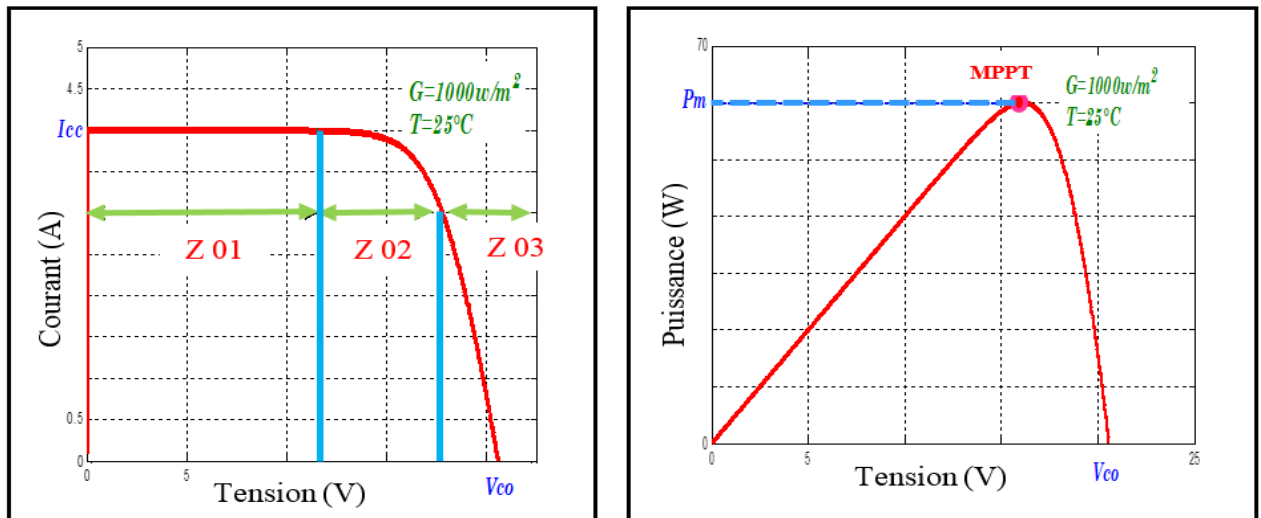
Dans notre cas, nous avons choisi le modèle d'une cellule réelle, où les paramètres sont donnés par le fabricant. Cette méthode est implémentée dans un programme MATLAB et elle est aussi applicable pour la modélisation des modules PV.

Dans les conditions standards, on a choisi une intensité de rayonnement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ , afin de mesurer la réponse du générateur photovoltaïque.

Tableau 2.1 Paramètres de caractérisation

Paramètre	$N_{\text{Cell}}$	$T_{\text{Cell}}$	$V_{\text{CON}}$	$I_{\text{CC}}$	$V_{\text{PM}}$	$I_{\text{PM}}$	$R_{\text{Sh}}$
Valeur Numérique	36 Cellules	$58.75^\circ\text{C}$	22.1V	3.99 A	17.6 V	3.69 A	$1\text{M}\Omega$

Les caractéristiques principales du générateur photovoltaïque sont I-V et P-V qui montrent comment un générateur photovoltaïque répondra à toutes les conditions possibles sous un ensemble particulier à des conditions d'ensoleillement et de température (Voir figure 2.4).



(a)

(b)

**Figure 2.4** Caractéristiques I(V) et P(V) d'un module photovoltaïque

La puissance débitée par le générateur photovoltaïque dépend du point « PPM » de la puissance maximale débitée par le générateur photovoltaïque [20].

Également la caractéristique I-V peut être divisée en trois zones :

- **Zone 1** : où le générateur est considéré comme une source de tension.
- **Zone 2** : où le générateur est considéré comme une source de courant, cette zone est préférable pour extraire le maximum de puissance possible fournit par le GPV.
- **Zone 3** : où la tension et le courant ne sont pas constants [20].

On remarque que les caractéristiques I(V) et P(V) passent par trois points importants qui sont :

- ✓ Le courant de court-circuit  $I_{cc} = 4 \text{ A}$
- ✓ La tension de circuit ouvert  $V_{co} = 21.2 \text{ V}$ .
- ✓ Le point de la puissance maximale PPM qui peut délivrer par le module étudié avec une puissance de 60 W.

### 2.2.2.2 Association en parallèle

Ce type d'association pour obtenir un courant important puisque l'association en parallèle des cellules délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celui d'une seule cellule [20].

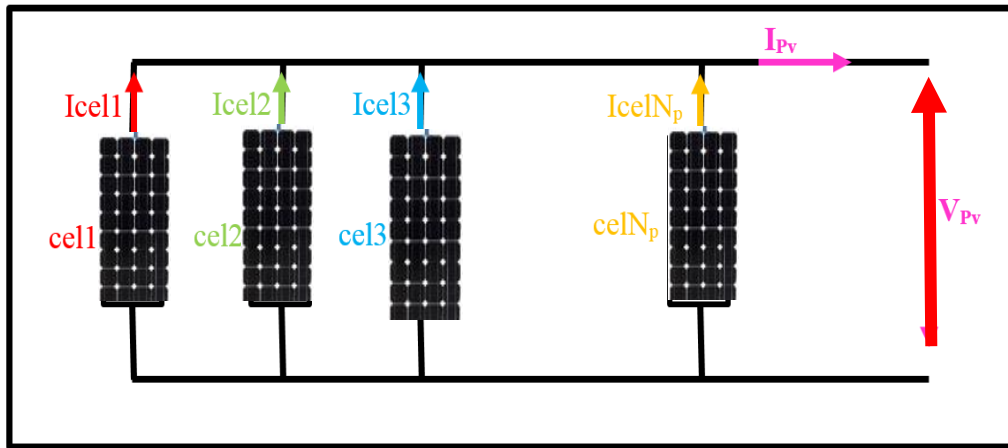


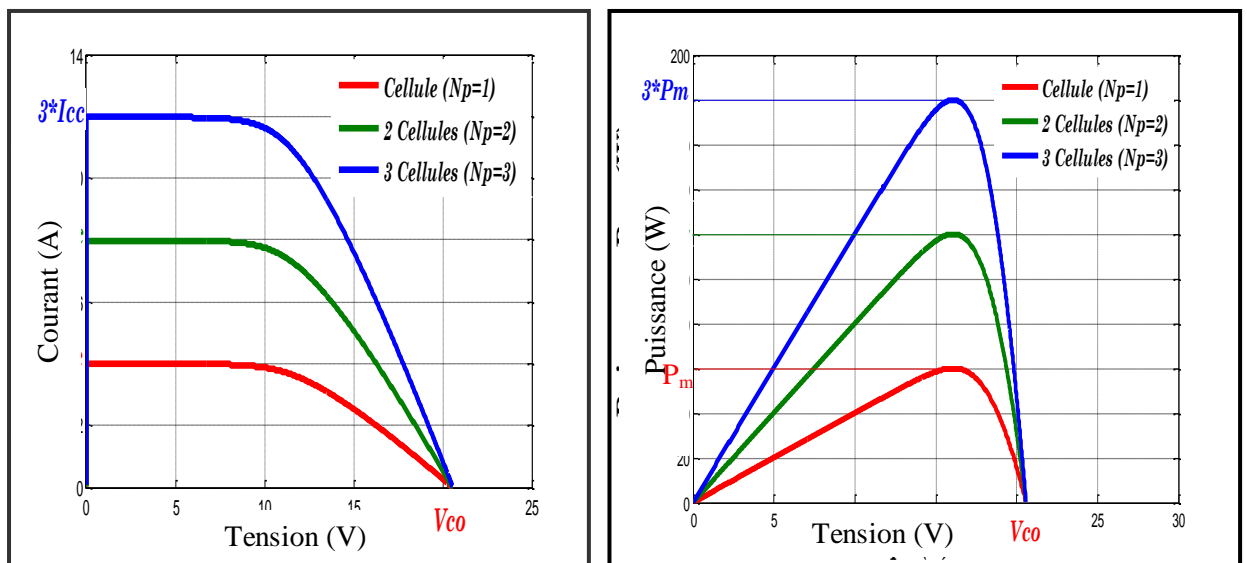
Figure 2.5 Association en parallèle

La figure (2.6) montre la caractéristique résultante ( $I_{PCC}, V_{PCO}$ ) obtenue en associant en parallèle (indice P)  $N_p$  cellules identiques ( $I_{CC}, V_{CO}$ ) :

$$\begin{cases} V_{PCO} = V_{CO} \\ I_{PCC} = N_p \times I_{CC} \end{cases}$$

Avec :

$N_p$  : nombre des cellules en parallèle.



(a)

(b)

Figure 2.6 Caractéristiques I(V) et P(V) résultantes d'un groupement en parallèle

### 2.2.2.3 Association en série

Ce type d'association a pour objectif d'obtenir une tension importante puisque l'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule.

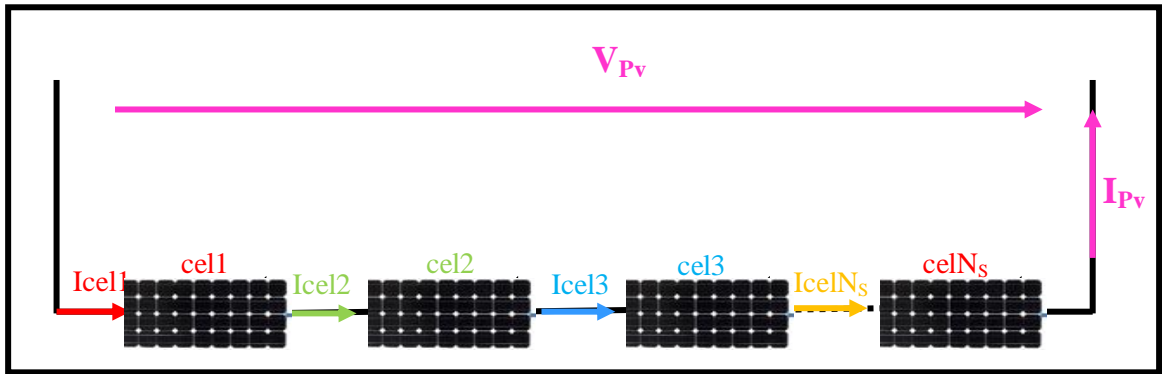


Figure 2.7 Association en série

La figure (2.8) montre la caractéristique résultante ( $I_{SCC}, V_{SCO}$ ) obtenue en associant en série (indice s)  $N_s$  cellules identiques ( $I_{CC}, V_{CO}$ ) :

$$\begin{cases} V_{SCO} = N_s \times V_{CO} \\ I_{SCC} = I_{CC} \end{cases}$$

Avec :

$N_s$  : nombre des cellules en série.

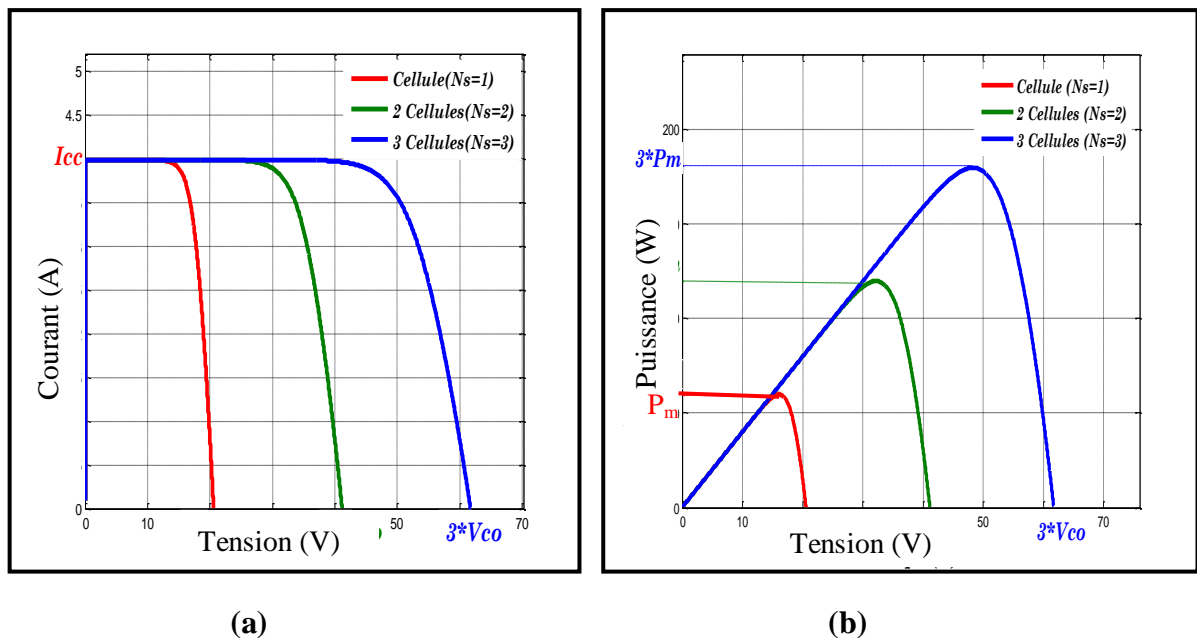


Figure 2.8 Caractéristiques I(V) et P(V) résultantes d'un groupement en série

### 2.2.2.4 Association mixte (série-parallèle)

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte c'est-à-dire série-parallèle [19,20].

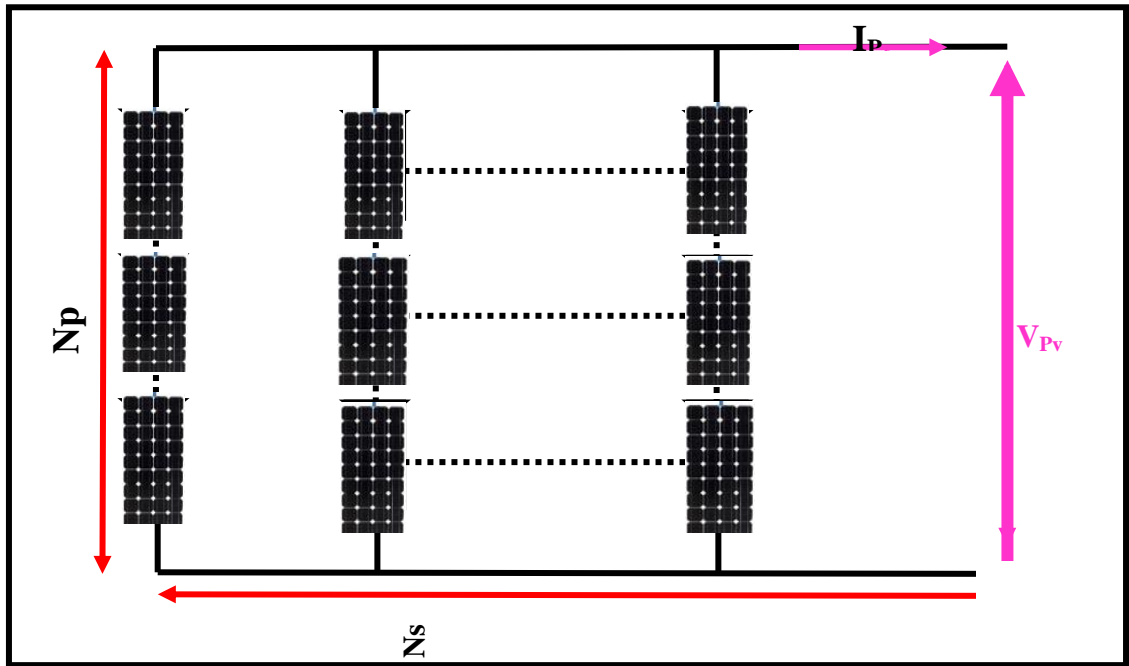


Figure 2.9 Association mixte (série-parallèle)

La figure (2.10) montre la caractéristique résultante ( $I_{MCO}, V_{MCO}$ ) obtenue en associant en série  $N_S$  cellules et en parallèle  $N_P$  cellules identiques ( $I_{CC}, V_{CO}$ ) :

$$\begin{cases} V_{MCO} = N_S \times V_{CO} \\ I_{MCC} = N_P \times I_{CC} \end{cases}$$

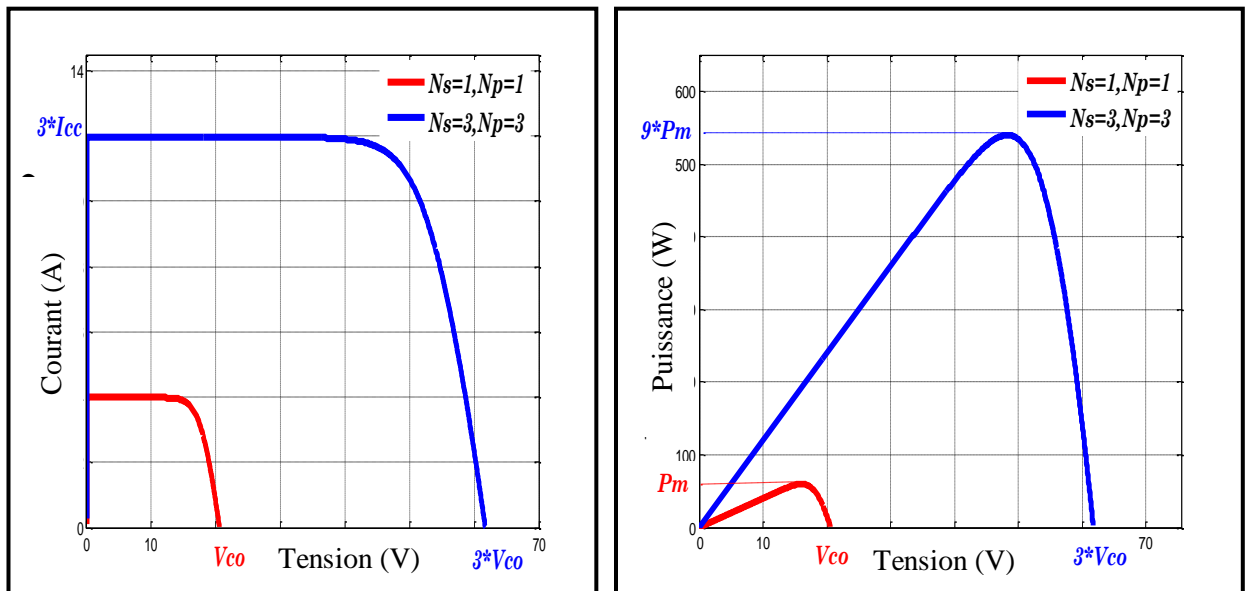


Figure 2.10 Caractéristiques I(V) et P(V) résultantes d'un groupement mixte

### 2.2.3 Influence des paramètres

Pour mieux connaître la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, il est utile d'étudier le comportement de la cellule et du module PV en fonction de l'éclairement et de la température qui modifient les caractéristiques I (V) et P (V), pas dans sa forme générale mais pour les valeurs  $I_{CC}$ ,  $V_{CO}$ ,  $I_M$  et  $V_M$ , au contraire de la résistance série qui modifié la pente des courbes dans les caractéristiques sans toucher les valeurs  $I_{CC}$ .

#### 2.2.3.1 Influence de l'éclairement

En faisant varier l'éclairement entre  $250 \text{ W/m}^2$  et  $1000 \text{ W/m}^2$  avec un pas de  $250 \text{ W/m}^2$  à une température fixe ( $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), les caractéristiques ( $I_{PV}(V_{PV})$ ,  $P_{PV}(V_{PV})$ ) sont données par la figure (2.11). On remarque que le courant du court-circuit  $I_{CC}$  est directement proportionnel à l'intensité lumineuse incidente; la variation de courant  $I_{CC}$  avec l'éclairement est donnée sous la forme suivante [21]:

$$I_{CC} = I_{Ph} = \alpha(T) \times G \times S$$

$\alpha(T)$  : Coefficient de la température [A/W].

$S$  : Surface de la cellule [ $\text{m}^2$ ].

D'autre part, l'accroissement de l'éclairement provoque une augmentation de la puissance fournie et une grande augmentation du courant  $I_{CC}$ , par contre une légère augmentation de la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  [22].

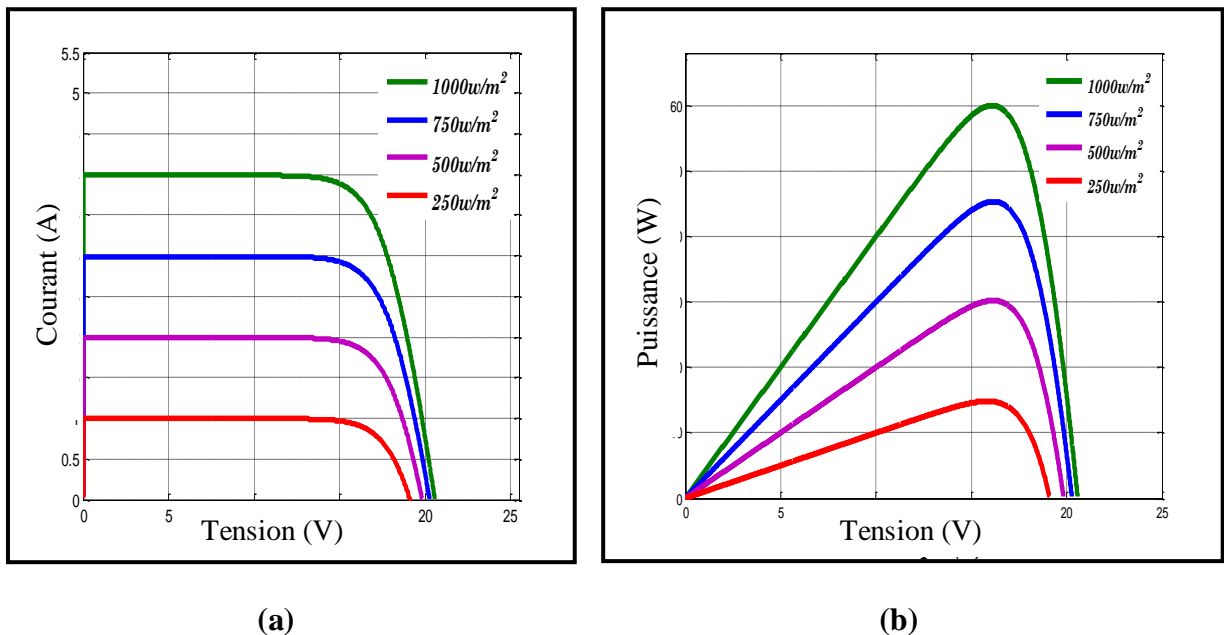
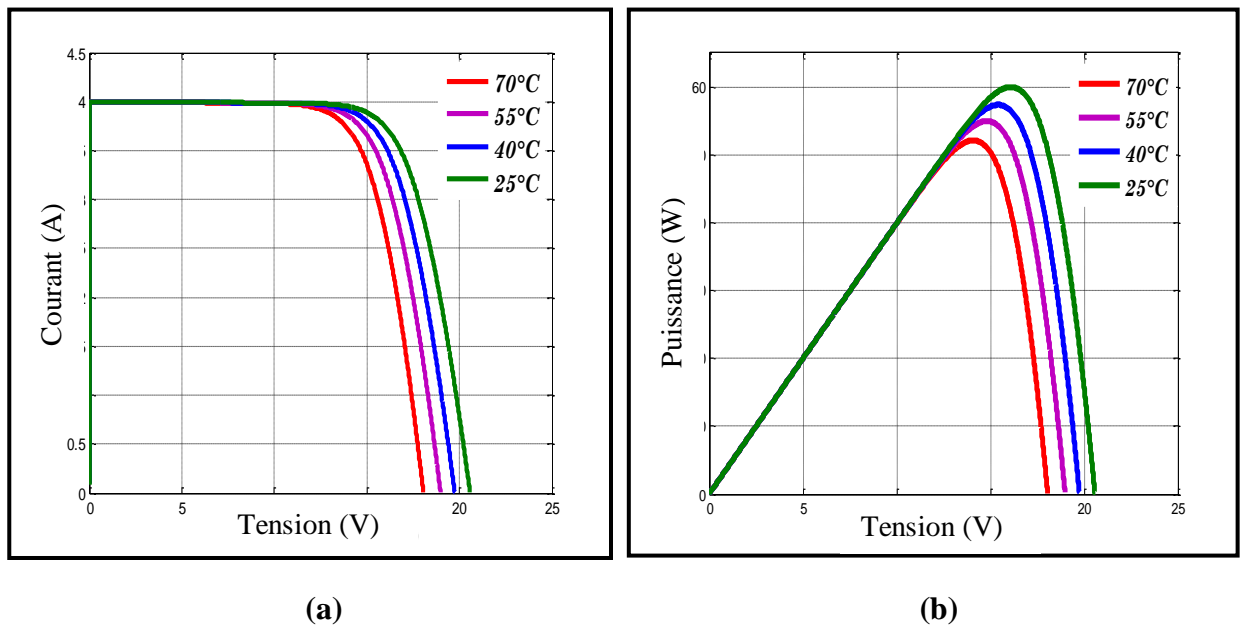


Figure 2.11 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et P(V)

La figure montre que l'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface.

### 2.2.3.2 Influence de la température

En faisant varier la température de 25°C jusqu'à 70°C avec un pas de 15°C à un éclairement fixe ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ), les caractéristiques ( $I_{PV}(V_{PV})$ ,  $P_{PV}(V_{PV})$ ) sont données par la figure (2.12). On remarque que la valeur du courant de court-circuit  $I_{CC}$  reste stable. Par contre, la tension en circuit ouvert  $V_{CO}$  baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue [20].



**Figure 2.12** Influence de la température sur les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$

La figure montre que l'influence de la température est plus réduite par rapport à ce de l'ensoleillement, mais il n'est plus négligeable [20].

### 2.2.3.3 Influence de la résistance série

En faisant varier la résistance série de  $R_S$  jusqu'à  $4 \times R_S$  avec un pas de  $R_S$  à un éclairement et température fixe ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ), les caractéristiques ( $I_{PV}(V_{PV})$ ,  $P_{PV}(V_{PV})$ ) sont données par la figure (2.13). On remarque que la valeur du courant de court-circuit  $I_{CC}$  et la tension en circuit ouvert  $V_{CO}$  ne sont pas modifiées, mais les caractéristiques ( $I_{PV}$ ,  $P_{PV}$ ) se déforment très rapidement sous l'effet de  $R_S$  (la pente), cette influence se traduit par une diminution dans les caractéristiques ( $I_{PV}$ ,  $P_{PV}$ ) dans la zone où la cellule fonctionne comme une source de tension (**Zone3**) et aussi dans la (**Zone 2**) [20,21].

La figure montre que l'augmentation de la résistance série a un effet réductif considérable sur le point de fonctionnement.

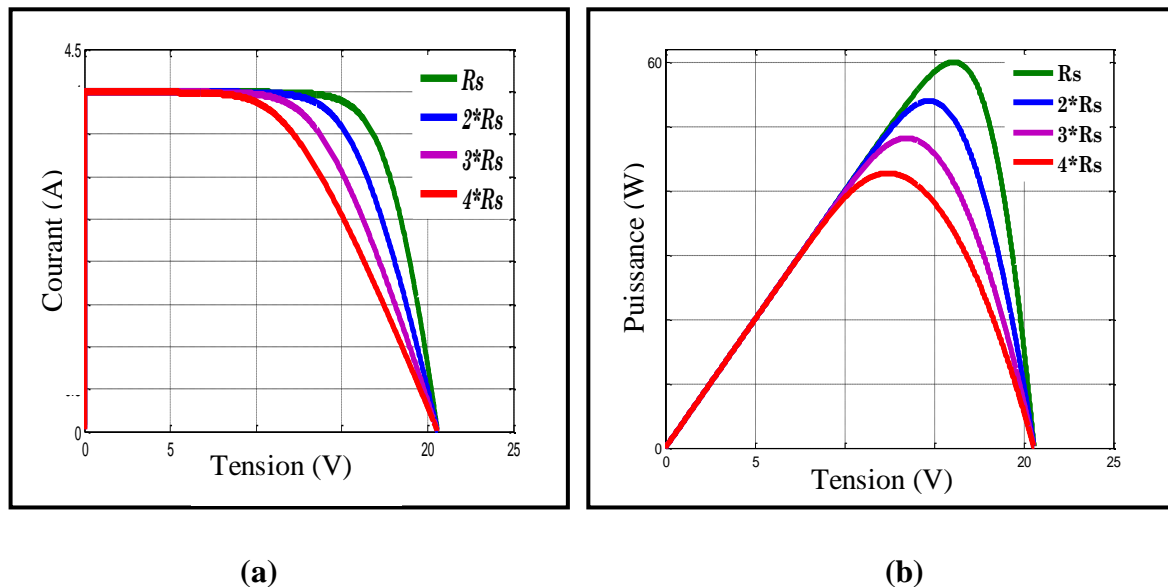


Figure 2.13 Influence de la résistance série sur les caractéristiques I(V) et P(V)

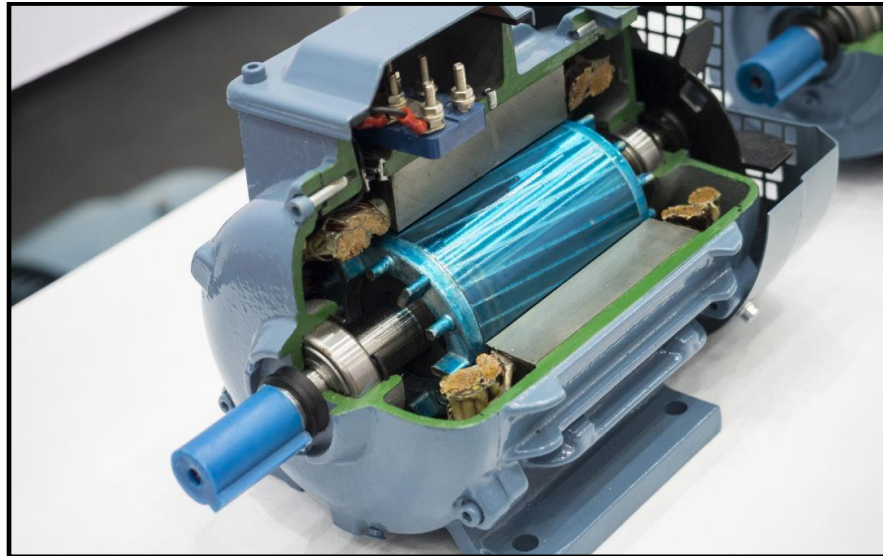
## 2.3 Modélisation du groupe moteur pompe

### 2.3.1 Moteur électrique

Le moteur d'un groupe motopompe convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu (Moteur DC à aimant permanent) ou alternatif (Moteur asynchrone). 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 plus intéressant.[23].

#### 2.3.1.1 Moteurs asynchrones :

La machine asynchrone, connue également sous le terme d'origine anglo-saxonne de « machine à induction », est une machine à courant alternatif sans alimentation électrique du rotor. Le terme anglais provient des courants induits dans le rotor par induction magnétique. 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 [23].



**Figure 2.14** Machine asynchrone

### 2.3.1.2 Moteur DC à aimant permanent

Ces dernières années, l'utilisation de moteurs à courant continu à aimants permanents comme moteurs d'entraînement pour les systèmes de pompes photovoltaïques a rapidement augmenté. En fait, ce type de moteur a de bonnes performances et ne nécessite aucun entretien. De plus, par rapport à d'autres types de pompes, le système centrifuge présente de nombreux avantages: sa petite taille, son fonctionnement relativement silencieux, tous les types de moteurs du marché sont faciles à mettre en œuvre. L'unité de pompage étudiée dans notre système est constituée d'une pompe centrifuge entraînée par un moteur à courant continu à aimant permanent.[24]

#### - Principe de fonctionnement

Si un conducteur en forme de spirale à travers lequel passe le courant  $I$  est placé dans un champ magnétique, il sera soumis à la force de Laplace. Ces forces génèrent un couple qui fait tourner la spire autour de son axe. Une fois la spire tournée d'un demi-tour, la polarité doit être inversée pour inverser la direction de la force et continuer à bouger. Ce sera le rôle du collecteur. Le rotor (partie tournante) est constitué d'un noyau métallique avec un bobinage en cuivre. Le stator a des aimants permanents. Les aimants permanents génèrent un champ magnétique et le flux magnétique du champ magnétique traverse le rotor. L'espace étroit entre le rotor et le stator s'appelle l'entrefer [24].

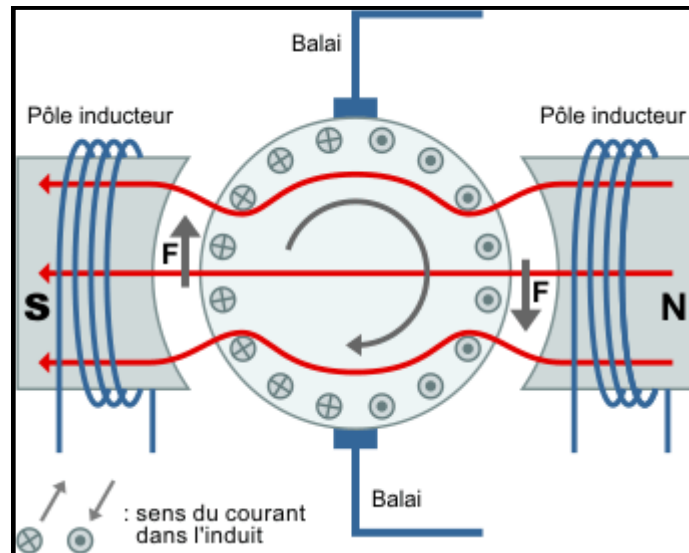


Figure 2.15 Structure d'un moteur DC à aimant permanent

### 2.3.1.3 Modélisation du moteur DC à aimant permanent

La modélisation du moteur est réalisée à partir des équations de fonctionnement de base de la machine actuelle.[25]

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + K_e \omega \quad (2.13)$$

$$C_e = K_c \cdot I_a \quad (2.14)$$

$$C_e - C_r = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.14)$$

Où:

$K_e$  : Coefficient de la tension.

$K_c$  : Coefficient du couple moteur.

$I_a$  : Courant d'induit du moteur.

$R_a$  : Résistance de l'induit du moteur.

$C_e$  : Couple électromagnétique du moteur.

$C_r$  : Couple de charge.

$\omega$  : Vitesse de l'arbre du moteur

$J$  : Moment d'inertie.

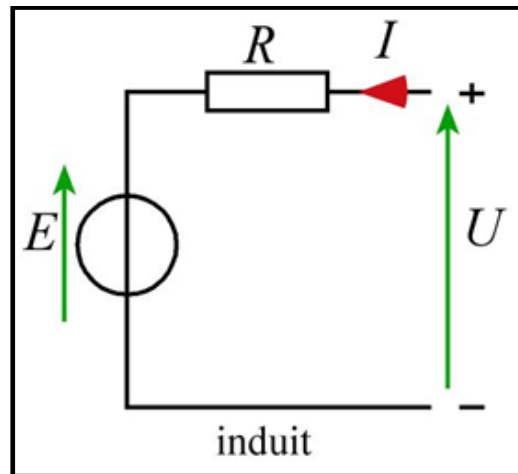


Figure 2.16 Modèle électrique de l'induit du moteur à aimant permanent

### 2.3.2 Pompes à eau :

On peut classer selon leur principe de fonctionnement les pompes à eau, soit de type volumétrique ou centrifuge. Outre ces deux classifications que nous décrirons plus loin, on distingue 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 et dans la pratique à 6 ou 7 mètres. Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-ci. Ces pompes doivent également être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau. Les pompes à refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe, soit le moteur en surface la transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur.[26]

#### 2.3.2.1 Pompe centrifuge

Une pompe centrifuge est le type de pompe le plus souvent utilisé dans les forages. Elle fonctionne avec une turbine rotative à grande vitesse dans un boîtier qui est appelé une scène. La turbine lance l'eau radialement hors du boîtier par la force centrifuge. Si plus de pression est nécessaire qu'un seul étage peut produire, des étages supplémentaires sont ajoutés (similaire à l'ajout de panneaux solaires pour augmenter la sortie de tension).[26]

Une pompe centrifuge doit tourner à une certaine vitesse avant de pouvoir surmonter la portance statique nécessaire pour pomper l'eau dans le réservoir de stockage.

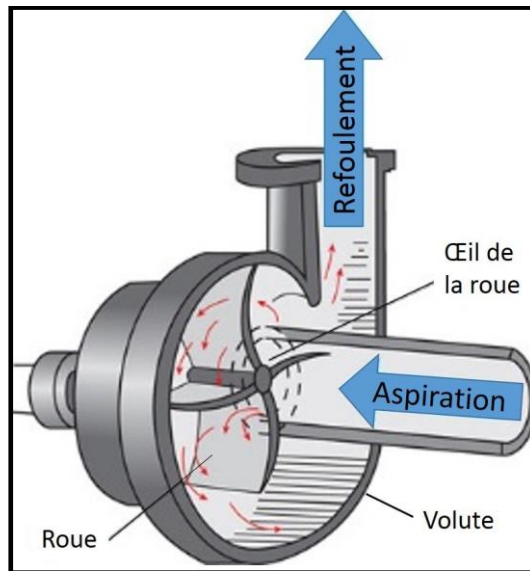


Figure 2.17 Pompe centrifuge

Les caractéristiques des pompes centrifuges sont particulièrement intéressantes dans le cadre de l'utilisation des modules photovoltaïques :[27]

- Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage, la pompe tourne même par très faibles 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 photovoltaïques, fournissant un bon rendement global.

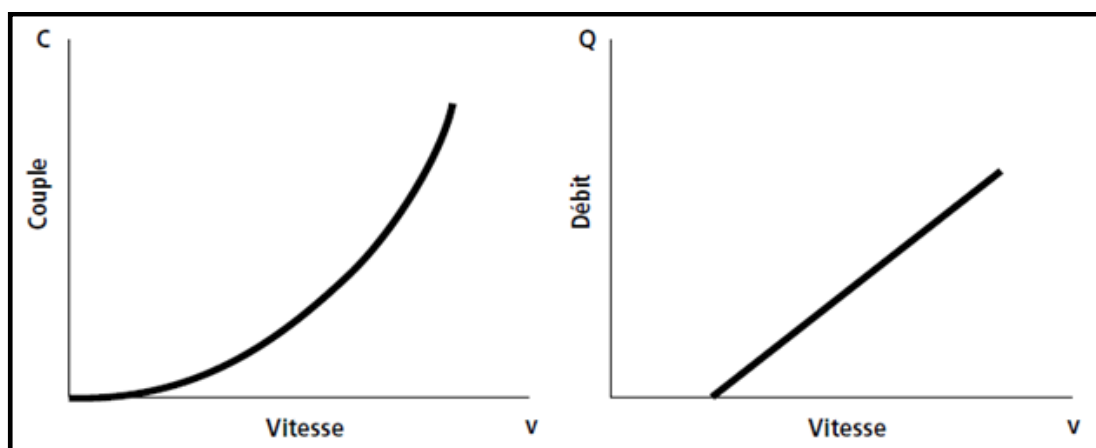


Figure 2.18 Courbes des caractéristiques des pompes centrifuges

### 2.3.2.2 Pompe volumétrique :

La pompe volumétrique, le fluide est mis en mouvement par une variation du volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement.

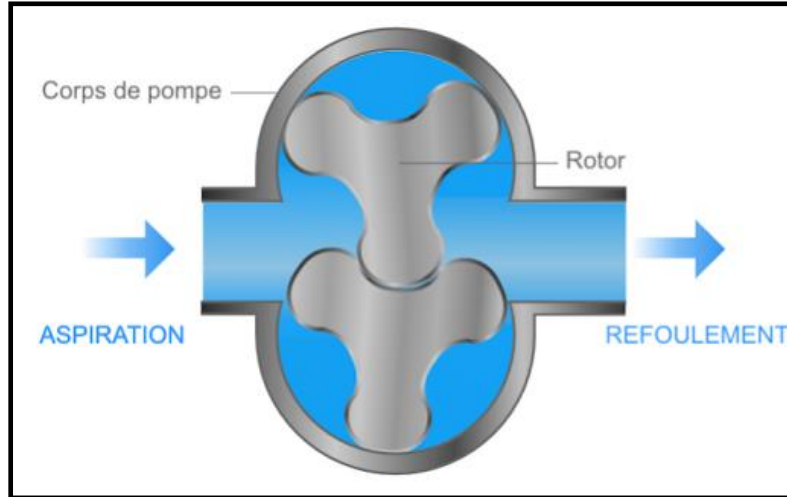


Figure 2.19 Pompe volumétrique.

Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur. Mais son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale (HMT) et est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur. La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau[27].

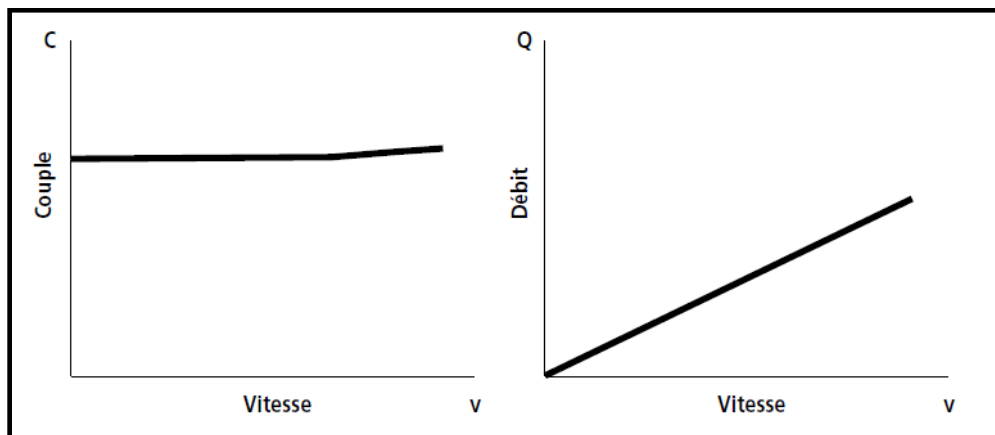


Figure 2.20 Courbes des caractéristiques de la pompe volumétrique

### 2.3.2.3 Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique

Le tableau 2.2 représente une comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique selon quelque facteur [28].

**Tableau 2.2** Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique

<b>Facteur</b>	<b>Pompe centrifuge</b>	<b>Pompe volumétrique</b>
<b>Mécanique</b>	Les turbines transmettent la vitesse du moteur au liquide, ce qui aide à déplacer le fluide vers l'orifice de décharge (produit un débit en créant de la pression) .	Piéger des quantités confinées de liquide et le forcer de l'aspiration à l'orifice de décharge (produit de la pression en créant un écoulement).
<b>Performance</b>	Le débit varie avec un changement de pression.	Le débit reste constant avec un changement de pression.
<b>Viscosité</b>	Le débit diminue rapidement avec l'augmentation de la viscosité, même avec une épaisseur modérée, en raison des pertes par frottement à l'intérieur de la pompe.	Grâce aux dégagements internes, les viscosités élevées sont manipulées facilement et le débit augmente avec la viscosité croissante.

### 2.3.2.4 Modélisation de la pompe de type centrifuge

La pompe centrifuge fonctionne on se basant sur trois paramètres, le débit et la vitesse, la hauteur manométrique. La hauteur de pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique [29].

Dans cette application, la puissance hydraulique de la pompe centrifuge est donnée par :

$$P_h = \eta_{mp} \cdot P_{ele} = \rho \cdot g \cdot HMT \cdot Q \quad (2.15)$$

Avec :

$P_h$ : Puissance communiquée au fluide par la pompe (W) ;

$P_{ele}$ : Puissance électrique du moteur asynchrone (W) ;

$\eta_{mp}$  : Rendement du groupe motopompe (%) ;

$g$ : Accélération de la pesanteur ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ) ;

$\rho$  : Masse volumique de l'eau ( $1000 \text{ Kg/m}^3$ ) ;

$Q$ : Débit volumique ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) ;

$HMT$ : Hauteur manométrique totale que doit convaincre la pompe (m).

La pompe centrifuge oppose un couple résistant  $C_r$ .

$$C_r = K_r \cdot \Omega^2 \quad (2.16)$$

Où :

$\Omega$  : Vitesse du moteur asynchrone(rad/s)

Avec  $K_r$  est un coefficient de proportionnalité [ $\text{Nm}/ (\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})^2$ ] qui est exprimé par l'équation suivante :

$$K_r = \frac{P_n}{\Omega_n} \quad (2.17)$$

$P_n$  : Puissance nominale du moteur (W).

$\Omega_n$  :Vitesse nominale du moteur (rad/s).

## 2.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté premièrement la modélisation du système solaire photovoltaïque avec l'influence des caractéristiques, ensuite nous avons donné des généralités sur les moteurs et les pompes à eau avec leurs modélisations.

# *Chapitre III*

*Simulation du système de  
pompage solaire  
photovoltaïque*

### 3.1 Introduction

Dans les régions éloignées, le pompage d'eau à l'aide de l'énergie solaire photovoltaïque est une solution bien adaptée pour ces régions. En effet, la majorité de ces régions sont très ensoleillées (sud algérien) et cette énergie a l'avantage d'être illimitée et propre contrairement à l'énergie conventionnelle qui présente les contraintes d'éloignement du réseau électrique et les contraintes du transport du combustible et les entretiens périodiques.

Plusieurs recherches traitent ce sujet, tels que le pompage d'eau d'irrigation par l'énergie solaire photovoltaïque, surtout pour l'optimisation technico-économique. Dans ce chapitre, un système complet de pompage solaire photovoltaïque sera présenté.

### 3.2 Etage d'adaptation DC/DC à la charge

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur PV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme il est illustré dans la figure 3.1. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de  $P_{max}$  disponible [30].

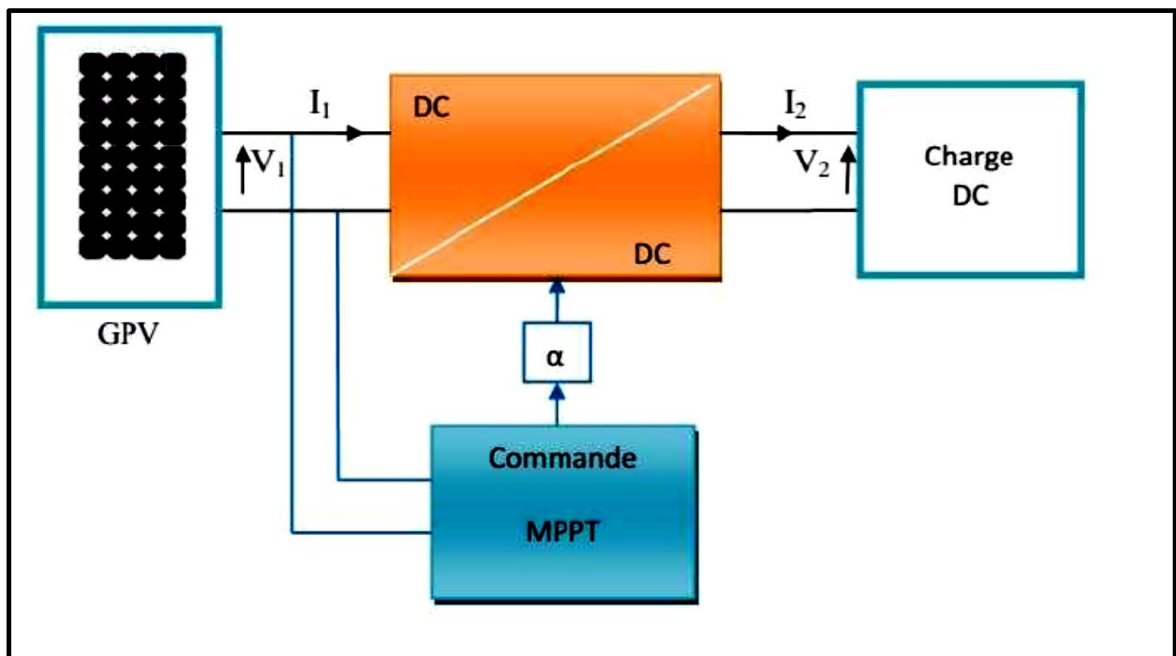


Figure 3.1 Étage d'adaptation entre un GPV et une charge

### 3.2.1 Convertisseur DC-DC

Un convertisseur DC-DC (hacheur) est un dispositif électrique qui permet de transformer une tension continue de valeur fixe en une tension continue réglable. Il est constitué de condensateur, d'inductance et d'un interrupteur qui peut être un transistor (pour faible puissance) ou un thyristor (pour grand puissance) [31]. Le rôle de ce convertisseur est de faire fonctionner les modules (panneaux PV) à leur point de puissance maximale quel que soit l'éclairement et la température pour délivrer cette puissance à l'utilisation. Les convertisseurs de tension continue DC-DC se démarquent par leur fonction. Ils augmentent, abaissent ou inversent la tension.

- Les convertisseurs électriques DC-DC qui **abaissent** la valeur de la **tension** sont appelés convertisseurs **Buck** ou **hacheurs séries**. Ces composants électriques sont très utilisés dans les ordinateurs ;
- Les convertisseurs **Boost**, ou **hacheurs parallèles**, augmentent la valeur de la tension continue. Ils permettent d'éviter l'utilisation de plusieurs accumulateurs disposés en série et de gagner de la place ou de miniaturiser les objets.
- Enfin, le convertisseur **Buck-Boost** convertit une tension continue en une tension continue de polarité inverse. Il est essentiellement utilisé pour les appareils électroniques portatifs, et permet d'optimiser la durée d'autonomie de la batterie tout en protégeant le système.

Dans notre étude nous utilisons un convertisseur Boost comme un étage d'adaptation.

#### 3.2.1.1 Principe du convertisseur Boost

La figure 3.2 représente le schéma du principe de base du convertisseur **Boost** (parallèle ou survolteur). Son application typique est de convertir sa **tension d'entrée** en une tension de **sortie supérieure**.

Nous avons le comportement suivant : lorsque le transistor **K** est passant la diode **D** est polarisée en inverse. D'où, la **source**  $V_e$  ( $V_e = V_{PV}$ ) n'est pas connectée à la charge **R**. Lorsque le transistor est bloqué, la diode est polarisée en direct et conduit. Ce qui connecte la charge **R** à la **source**  $V_e$  [31].

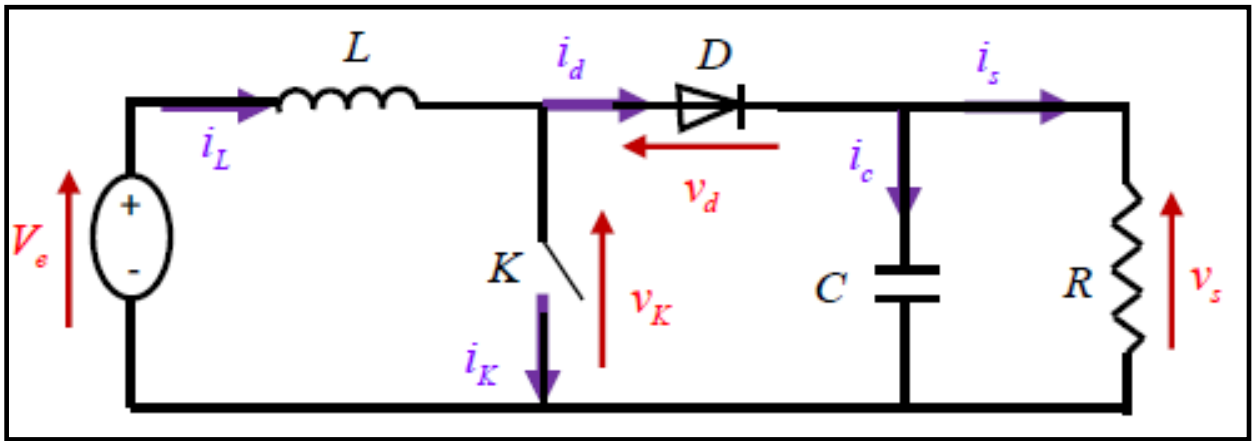


Figure 3.2 Circuit électrique du convertisseur Boost

Tel que :

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e \quad (3.1)$$

$\alpha$  : est le rapport cyclique de commutation ;

$V_e$  : est la tension d'entrée (tension du générateur photovoltaïque dans notre cas) ;

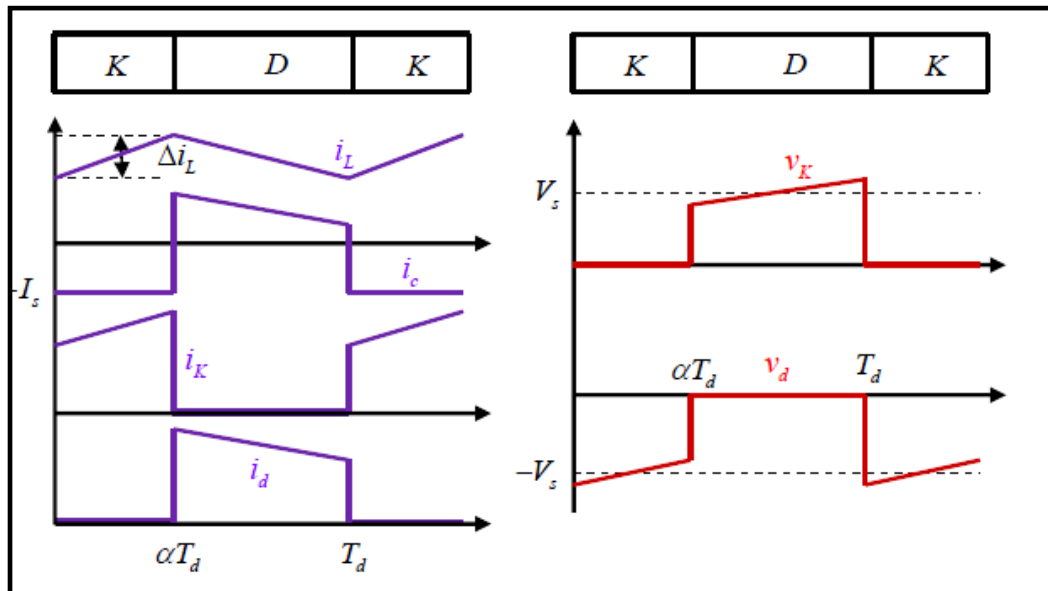
$V_s$  : est la tension de sortie aux bornes du hacheur.

L'équation (3.1) donne la **relation fondamentale** entre la tension d'entrée et la tension de sortie de ce convertisseur. De ce fait, on peut **augmenter** la tension d'entrée par l'utilisation d'un **circuit Boost**.

#### ▪ Fonctionnement

Au premier temps ( $\alpha T$ ), l'interrupteur (K) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Après l'ouverture de l'interrupteur (K) l'inductance (L) s'oppose à la diminution de courant ( $i_L$ ), génère une tension qui s'ajoutera à la tension de source. Elle sera appliquée sur la charge (R) à travers la diode (D) [32].

La valeur moyenne de la tension de sortie  $V_s$  (Equation 3.1)



**Figure 3.3** Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost

### 3.2.1.2 Avantages du convertisseur « BOOST »

Lorsqu'il est nécessaire d'augmenter la tension disponible à partir de l'alimentation CC, un convertisseur élévateur (hacheur survolteur) peut être utilisé. Les systèmes alimentés par des blocs-batteries utilisent généralement plusieurs batteries en série pour avoir un niveau de tension suffisamment élevé. L'espace disponible étant généralement limité, il se peut qu'il n'y ait pas toujours un nombre suffisant d'éléments. Le convertisseur élévateur peut augmenter la tension fournie par la source, réduisant ainsi le nombre de composants nécessaires pour atteindre le niveau de tension requis. Ce convertisseur s'avère très nécessaire pour notre système de pompage solaire photovoltaïque [33].

## 3.3 Commande MPPT

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est la commande de base pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de ce contrôle repose sur le changement automatique du rapport cyclique  $\alpha$ , afin de maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique (le hacheur) reliant la pompe à eau et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à chaque instant [34].

### 3.3.1 Principe de la commande MPPT

De nombreuses méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) ont été développées pour permettre au système d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque. Le principe de ces méthodes est de déplacer le point de fonctionnement en augmentant  $V_{pv}$ , lorsque  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}$  est positif ou en diminuant  $V_{pv}$ , lorsque  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}$  est négatif. Lors du régime transitoire ou permanent, ces commandes doivent estimer et comparer la puissance avec celle de l'instant précédent. Les performances de celles-ci sont liées à la rapidité avec laquelle le point PPM est atteint, à la manière d'osciller autour de ce même point, mais aussi à la robustesse pour éviter une divergence lors de changements brutaux d'ensoleillement ou de la charge.

Il existe plusieurs techniques de commande MPPT. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées [34].

Dans notre travail on a choisi la commande MPPT de type perturbation et observation (PO).

### 3.3.2 Algorithme perturbation et observation (PO)

L'algorithme (P&O) est très utilisé dans la recherche du MPPT car il est plus simple et exige moins de paramètres à mesurer. Son fonctionnement est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution (incrémentation ou décrémentation) du courant/tension ou en agissant directement sur le convertisseur (DC-DC), et l'observation de l'impact de cette perturbation sur la puissance de sortie du module photovoltaïque (figure 3.4) [35].

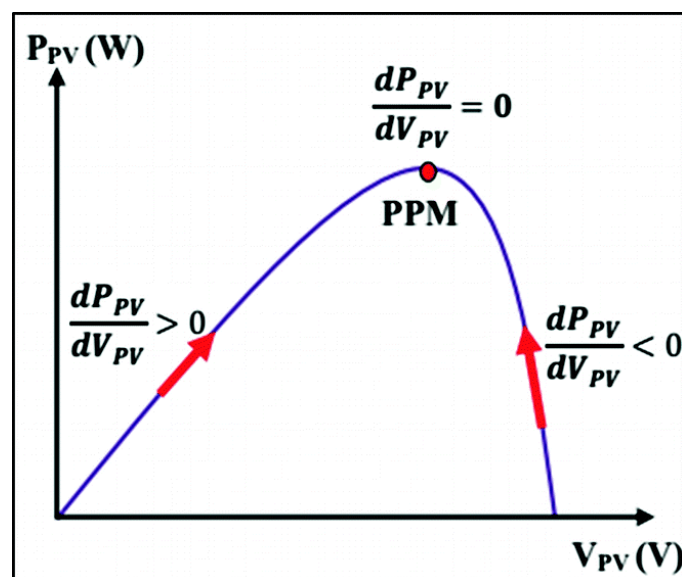


Figure 3.4 Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O

La figure 3.4 montre que si la puissance augmente la perturbation va continuer dans le même sens si non la perturbation sera inversée :

$dP > 0 \rightarrow$  Perturbation dans le même sens.

$dP < 0 \rightarrow$  Perturbation dans le sens inverse.

D'abord la tension  $V$  et le courant  $I$  sont mesurés (ou calculés) pour calculer la puissance  $P(k)$  à l'instant  $k$ .  $\Delta t$ . Cette valeur  $P(k)$  est comparée à la valeur de la puissance  $(k-1)$  obtenue durant la dernière mesure (ou le dernier calcul) à l'instant  $(k-1)$ .  $\Delta t$ .

1- Si la puissance fournie par le panneau a augmenté depuis la dernière mesure, l'incrémentación du rapport cyclique  $\alpha$  continuera dans le même sens que lors du dernier pas et ceci est fait par le test sur  $dV$ .

- Si  $dV > 0$  cela veut dire qu'on a incrémenté  $V$  durant le dernier pas :

$$\alpha(k+1) = \alpha(k) + \Delta\alpha$$

- Si  $dV < 0$  cela veut dire qu'on a décrémente  $V$  durant le dernier pas :

$$\alpha(k+1) = \alpha(k) - \Delta\alpha$$

Donc on termine dans le chemin où  $P$  continue à augmenter.

2- Si la puissance fournie par le panneau a diminué depuis la dernière mesure, l'incrémentación du rapport cyclique  $\alpha$  sera en sens inverse par rapport au dernier pas et ceci est fait aussi par le test sur  $dV$ . Avec cet algorithme la tension de fonctionnement  $V$  est perturbée dans chaque pas.

Cet algorithme est simple et facile à mettre en application, mais son inconvénient majeur est son mauvais comportement suite à un changement brusque des conditions météorologiques [35].

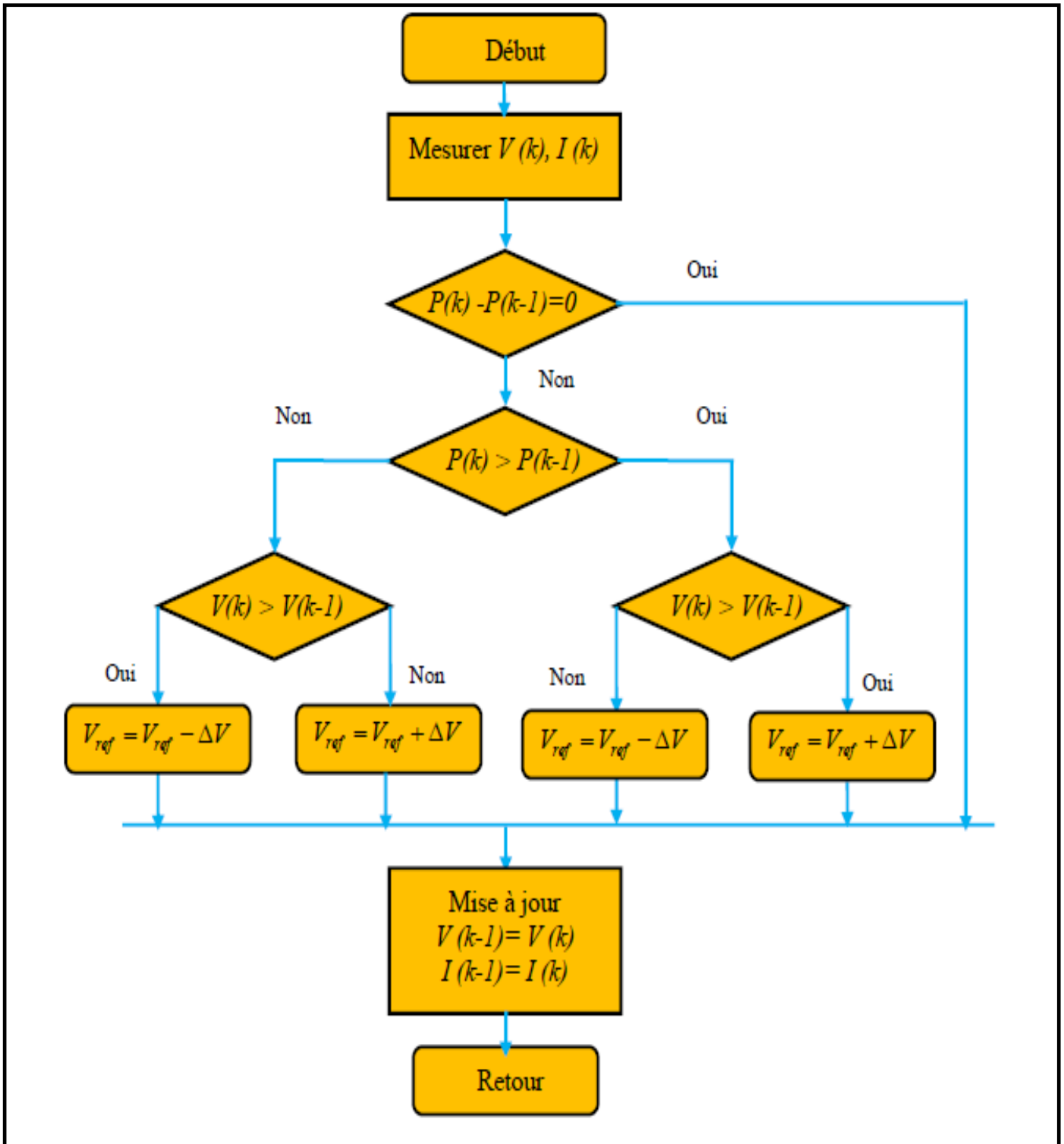


Figure 3.5 Organigramme de la méthode P&O

### 3.4 Commande de l'étage d'adaptation par la technique MLI

L'objectif de la commande de l'étage d'adaptation est de générer les ordres d'ouverture/fermeture des interrupteurs. La commande en MLI consiste en une succession rapide d'impulsions électriques.

On constate que la tension de sortie du convertisseur ne dépend que de la tension d'entrée et du rapport cyclique  $\alpha$ . Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, le convertisseur est toujours élévateur de tension. Sur la figure 3.6 nous présentons le signal de commande et la porteuse du hacheur (Boost) utilisé.

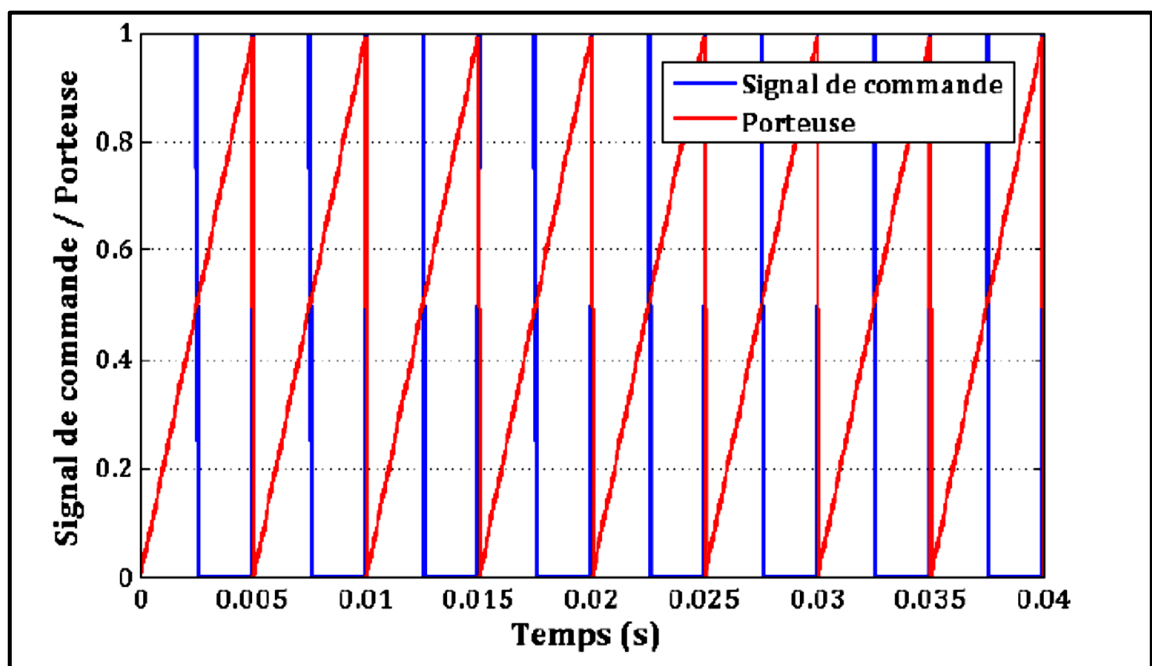


Figure 3.6 La porteuse et le signal de commande du hacheur Boost

On notera que la tension de sortie est théoriquement indépendante de la charge. La stratégie de régulation qui semble la plus évidente est la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) à fréquence fixe et rapport cyclique  $\alpha$  variable [36].

### 3.5 Simulation du système complet de pompage solaire photovoltaïque

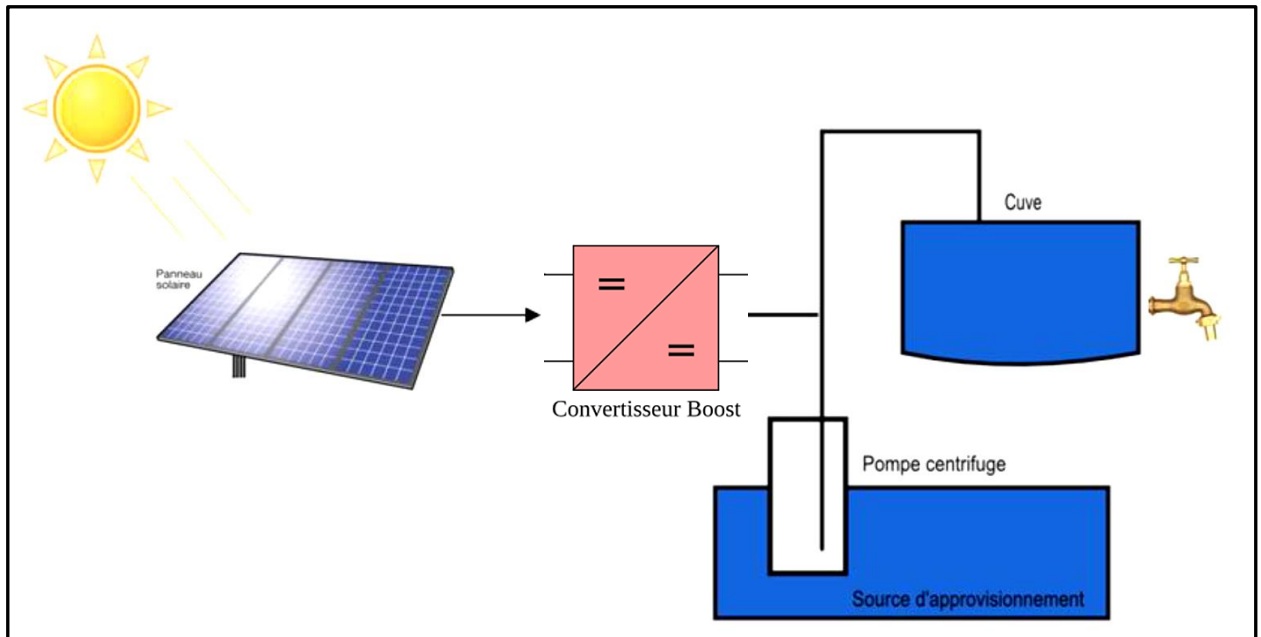


Figure 3.7 Organigramme du système de pompage solaire

#### 3.5.1 Résultats de simulation

##### A. Simulation du convertisseur BOOST

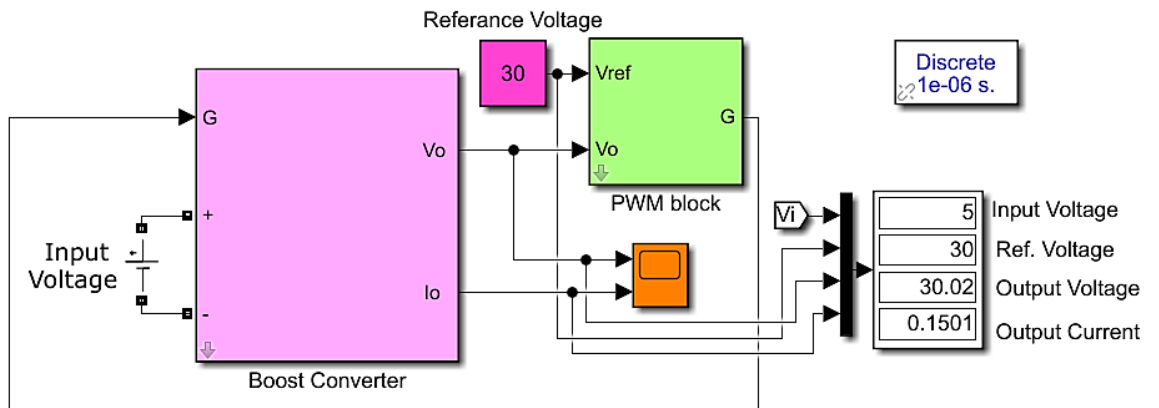


Figure 3.8 Modèle du convertisseur BOOST

La figure 3.8 représente le modèle de simulation du hacheur (Boost) avec la commande MLI.

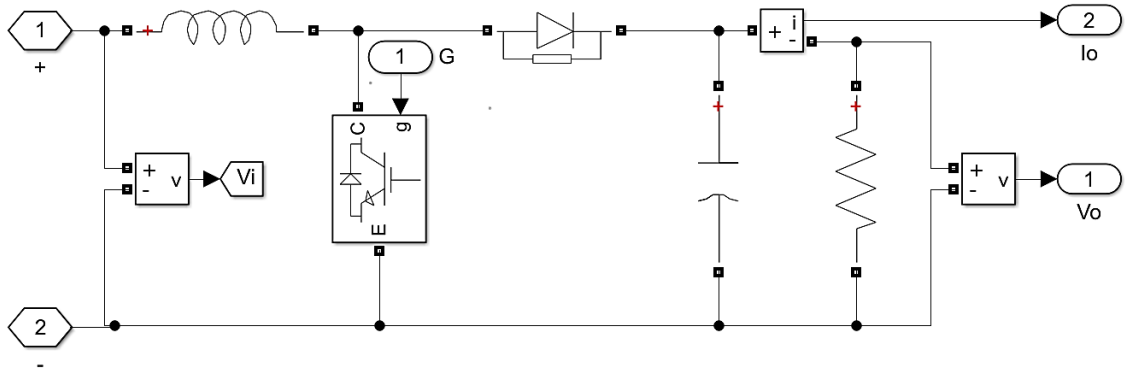


Figure 3.9 Schéma bloc du convertisseur BOOST

L'objectif de la commande de l'étage d'adaptation est de générer les ordres d'ouverture/fermeture des interrupteurs.

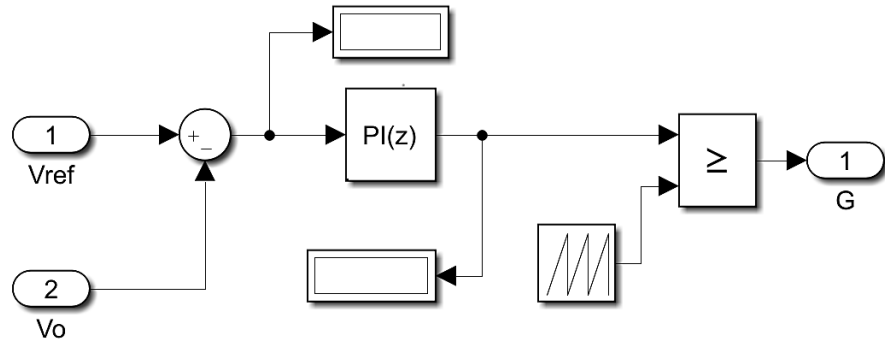


Figure 3.10 Schéma bloc de la commande MLI

La figure 3.10 montre le schéma bloc de la commande MLI pour le hacheur Boost. La commande en MLI consiste en une succession rapide d'impulsions électriques.

- Tension de sortie du hacheur (BOOST)

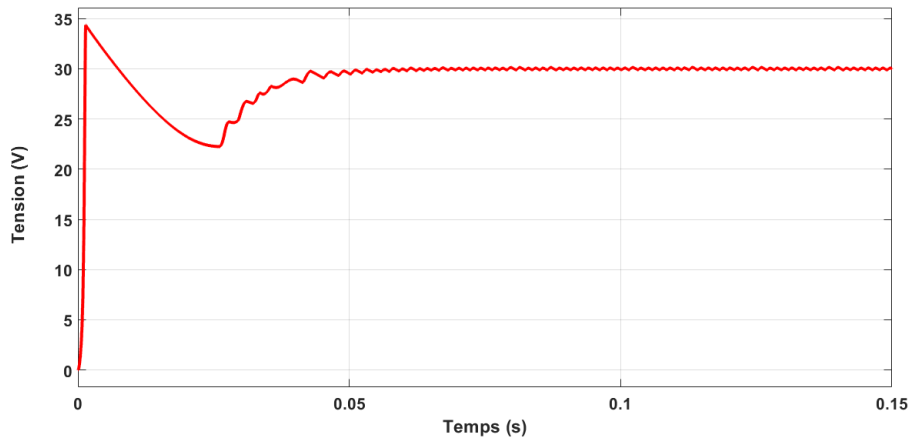


Figure 3.11 Tension de sortie du hacheur (Boost)

- Courant de sortie du hacheur (BOOST)

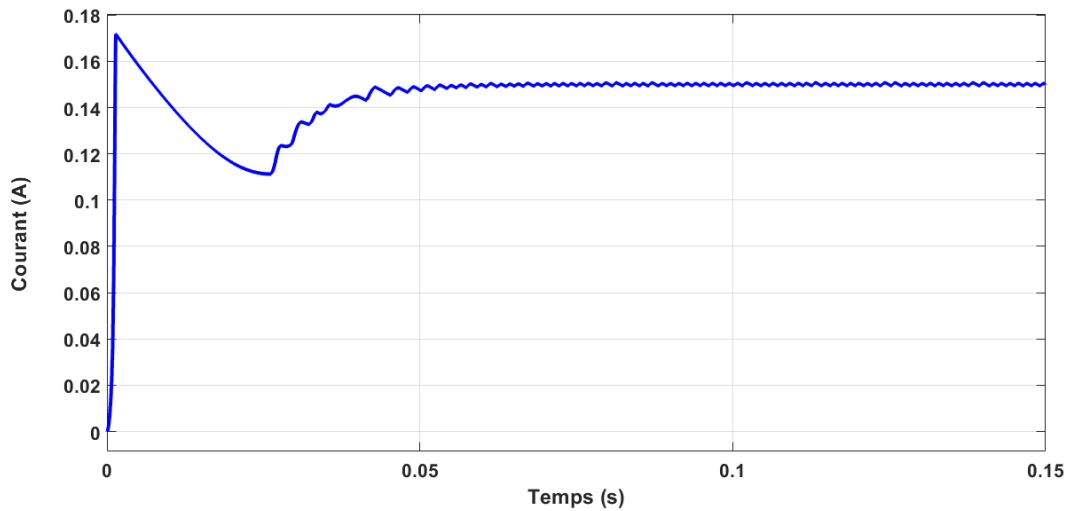


Figure 3.12 Courant de sortie du hacheur (Boost)

On remarque d’après les figures 3.11 et 3.12, le courant et la tension de sortie du hacheur (Boost) stabilisent dans les valeurs  $V=30\text{ V}$  et  $I=0.15\text{ A}$ . Le convertisseur (Boost) converti sa tension d’entrée  $V=5\text{ V}$  en une tension supérieure  $V=30\text{ V}$ . La stabilisation de la tension dans une valeur de  $30\text{ V}$  (Tension de référence), causée par la régulation en boucle ouverte avec un correcteur de type PI.

### B. Simulation de la commande MPPT (P&O)

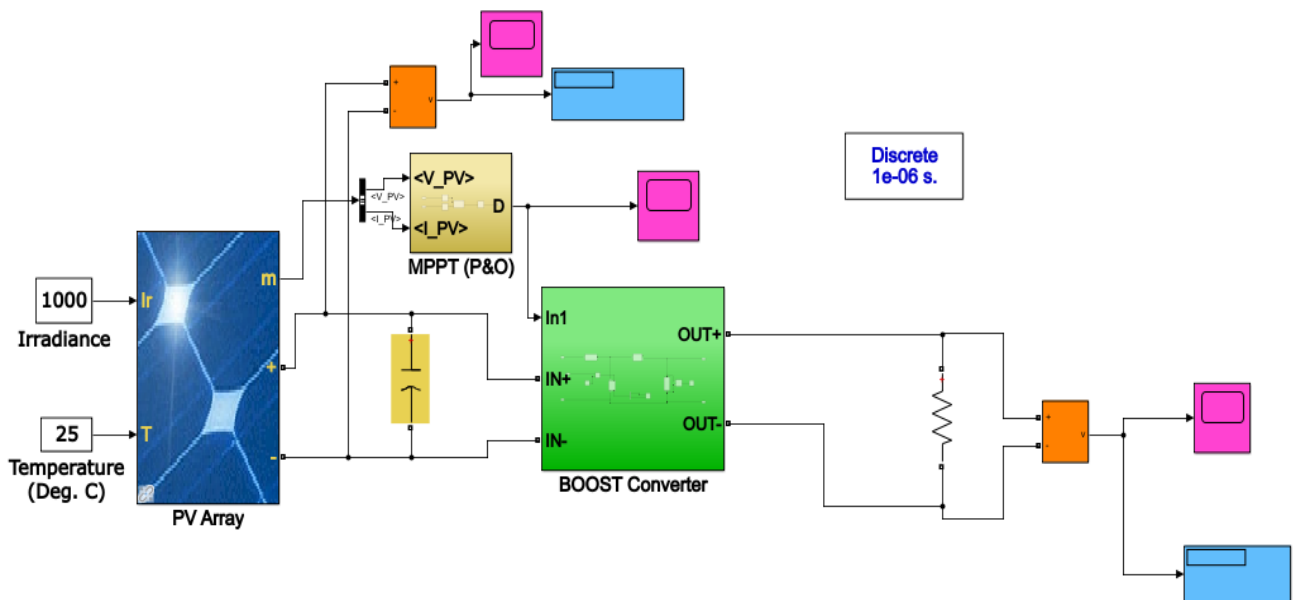
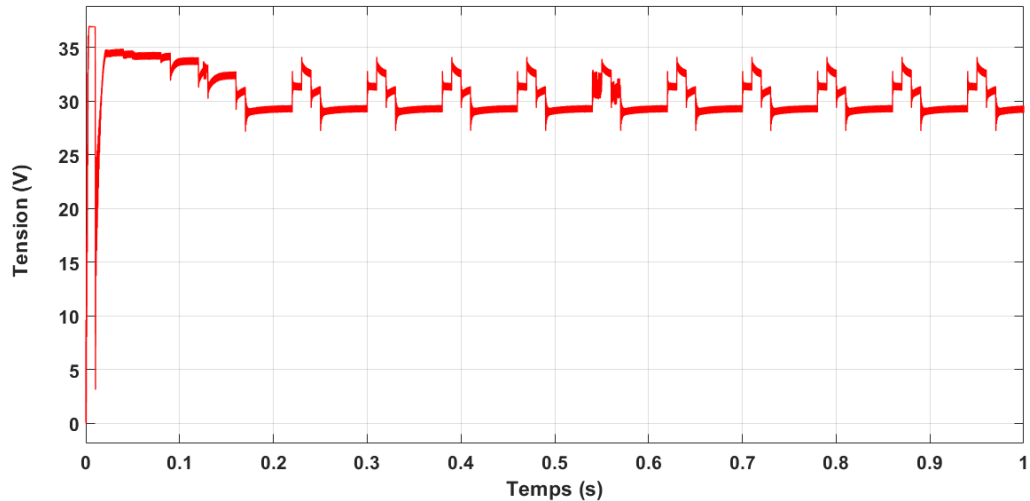


Figure 3.13 Schéma bloc Commande MPPT (P&O)

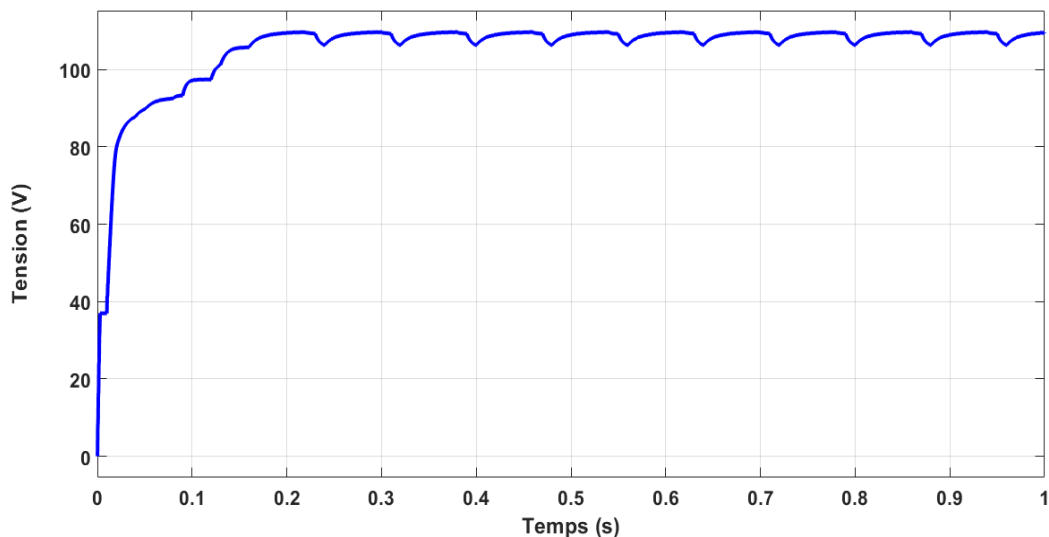
La figure 3.13 présente le schéma bloc de simulation de la commande MPPT par la méthode perturbation et observation (P&O) avec un étage d'adaptation entre la charge et le panneau photovoltaïque (PV).

- **Tension du PV**



**Figure 3.14** Tension avant la commande MPPT

- **Tension du PV après la commande MPPT (P&O) avec convertisseur BOOST**



**Figure 3.15** Tension après la commande MPPT

D'après le lancement de la simulation, on obtient les résultats des figures 3.10 et 3.11. Après la commande MPPT, on observe que le panneau solaire photovoltaïque fonctionne à sa valeur maximale.

Cette stratégie de commande a pour but de trouver le maximum de la puissance fournit par les panneaux photovoltaïques.

Pour trouver la puissance maximale fournit par les panneaux solaires, la MPPT va incrémenter la tension, de  $\Delta V$  préalablement réglé, aux bornes du panneau solaire et observer la nouvelle puissance. Si celle-ci augmente, la stratégie va continuer jusqu'à trouver le point maximum. Cependant si la nouvelle puissance diminue, la stratégie va soustraire la tension de  $\Delta V$ .

La stratégie va continuer de diminuer la tension jusqu'à retrouver la puissance maximale. Cette stratégie et aussi appelé P&O Perturbe et Observe.

### C. Simulation du système complet

La figure 3.16 présente le modèle de simulation du système complet de pompage solaire.

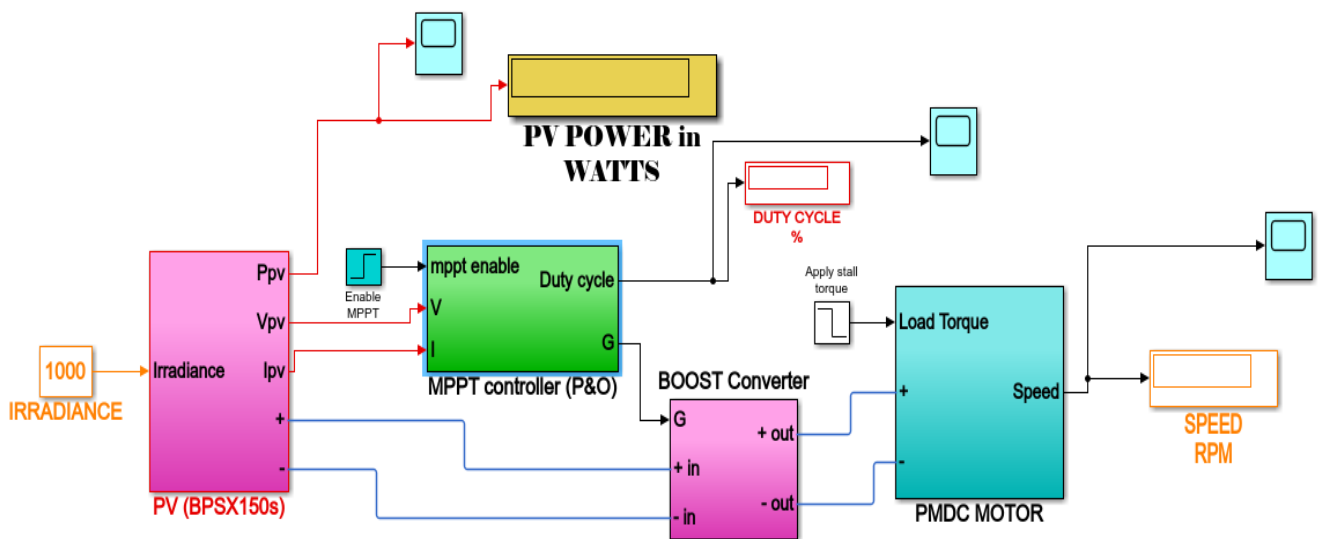


Figure 3.16 Schéma bloc du système complet

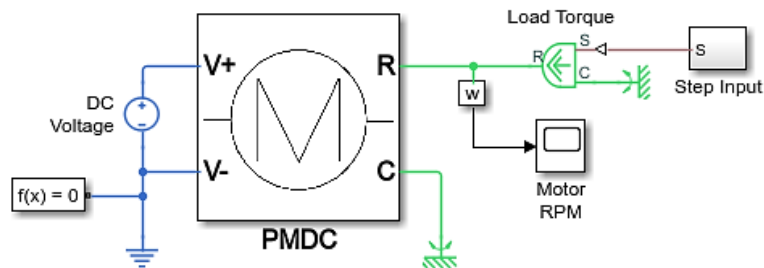
- Paramètres expérimentales du module photovoltaïque BP SX150s

Dans notre modèle de simulation, on a utilisé un panneau solaire de type BP SX150s d'une puissance de 150W constitué de 72 cellules en série, dont les caractéristiques électriques expérimentales sont celles rassemblées dans le **tableau 3.1** sous les conditions standards [37].

**Tableau 3.1** Données expérimentales du module photovoltaïque BP SX150s  
(à  $E=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ )

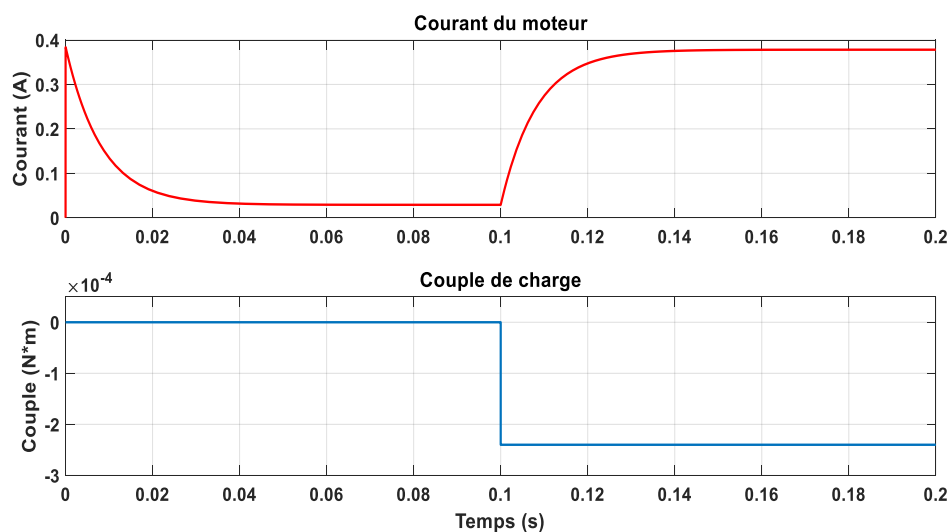
Caractéristiques électriques	Valeurs
Puissance maximale du module ( $P_{\max}$ )	150 W
Courant de court-circuit ( $I_{CC}$ )	4.75 A
Tension de circuit ouvert ( $V_{CO}$ )	43.5 V
Courant maximal ( $I_m$ )	4.35 A
Tension maximale ( $V_m$ )	34.5 V
Nombre de cellules en série ( $N_s$ )	72

- Simulation du moteur à courant continu à aimant permanent (PMDC)



**Figure 3.17** Schéma bloc du moteur PMDC

- Courant et couple de charge du moteur



**Figure 3.18** Courant et couple de charge du moteur PMDC

La figure 3.18 présente le courant et le couple de charge du moteur PMDC. D'après ces résultats, on observe que le courant du moteur augmente avec l'augmentation du couple de charge. Le moteur PMDC à un couple très important. On remarque aussi surintensité au démarrage, la pointe du courant va provoquer la détérioration de l'induit par échauffement excessif par effet de joule. Comme solution, on utilise des rhéostats de démarrages ou des variateurs de vitesse.

- **Puissance du PV**

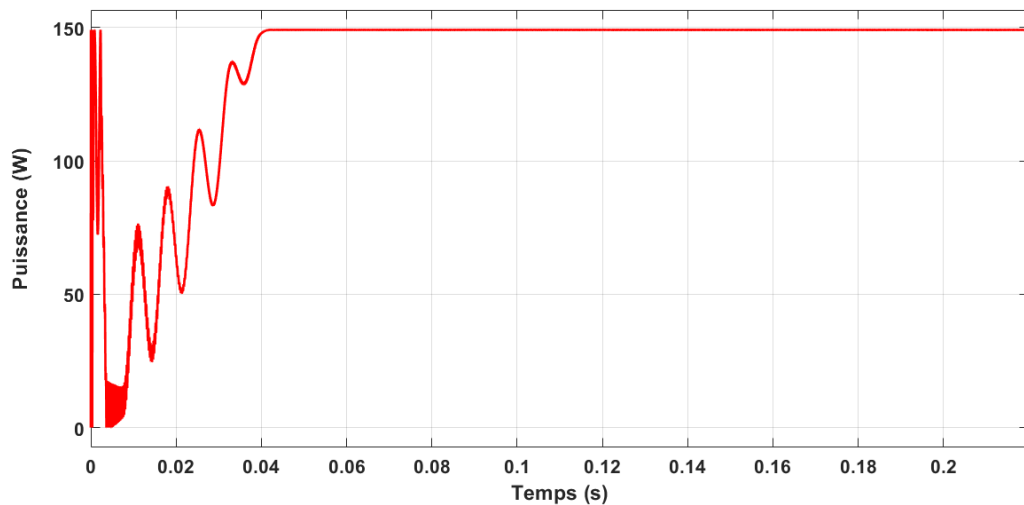


Figure 3.19 Puissance du PV

- **Vitesse du moteur PMDC**

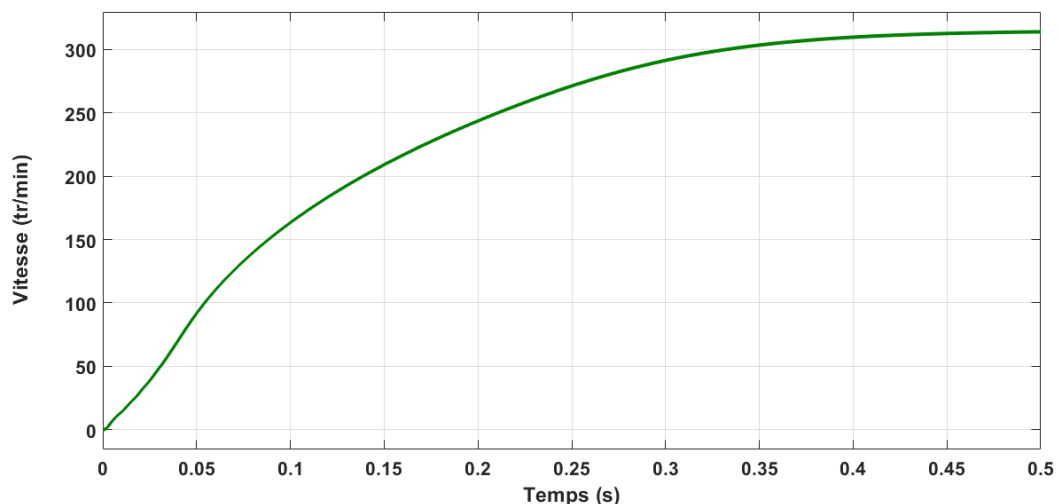
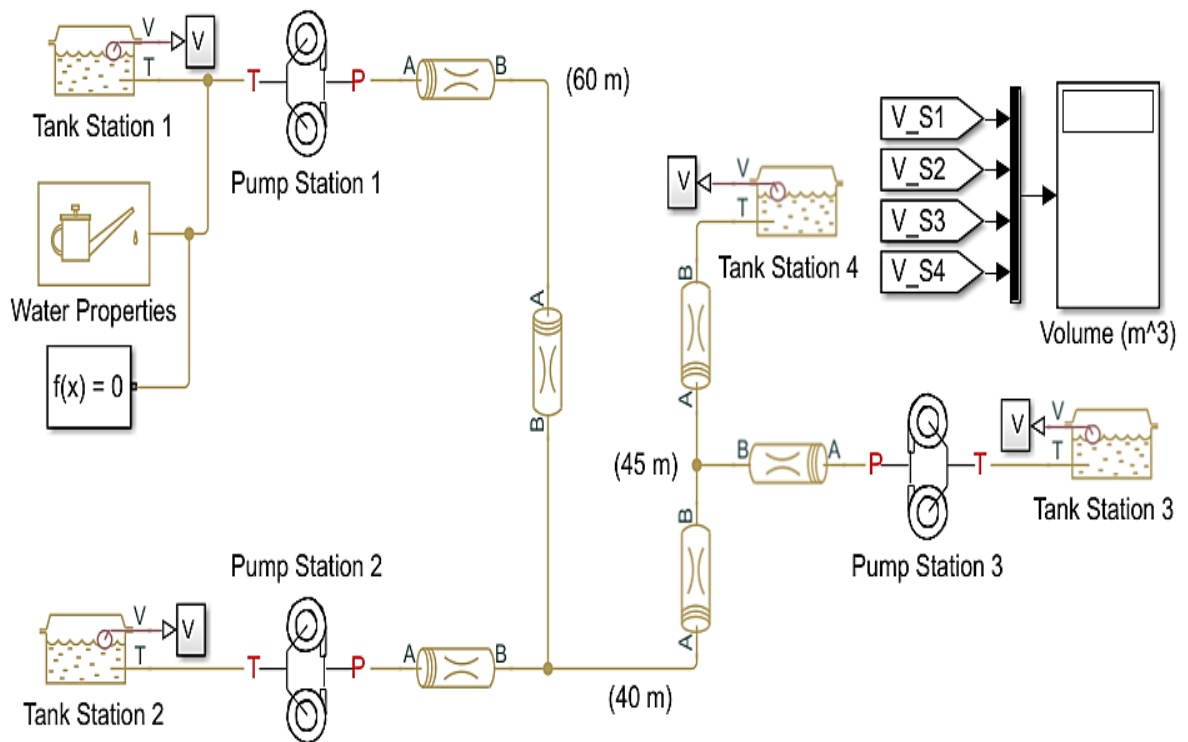


Figure 3.20 Vitesse du moteur PMDC

Les Figures 3.19 et 3.20 montrent respectivement la puissance du PV et la vitesse de rotation du moteur PMDC. On remarque que la puissance à une valeur maximale presque de 150 W à cause de la commande MPPT (P&O). On observe aussi que la vitesse de rotation du moteur augmente avec l'augmentation de la tension de sortie du convertisseur (Boost).

- **Modèle de simulation du pompage d'eau**

La figure 3.21 présente un modèle de simulation pour un système de pompage d'eau.



**Figure 3.21** Schéma bloc d'un système de pompage d'eau

Le système de pompage d'eau comprend : Trois stations de pompes (deux pompes pour chaque station), Quatre réservoirs d'eau et des tuyaux identiques de diamètre  $d = 112.1660$  mm mais avec des différentes longueurs en m.

Le type de la pompe utilisée dans ce système : **Pompe centrifuge** entraîné avec un moteur à courant continu à aimant permanent PMDC

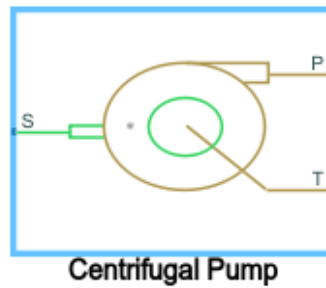


Figure 3.22 Pompe Centrifuge

Après le lancement de la simulation, on obtient les résultats suivants :

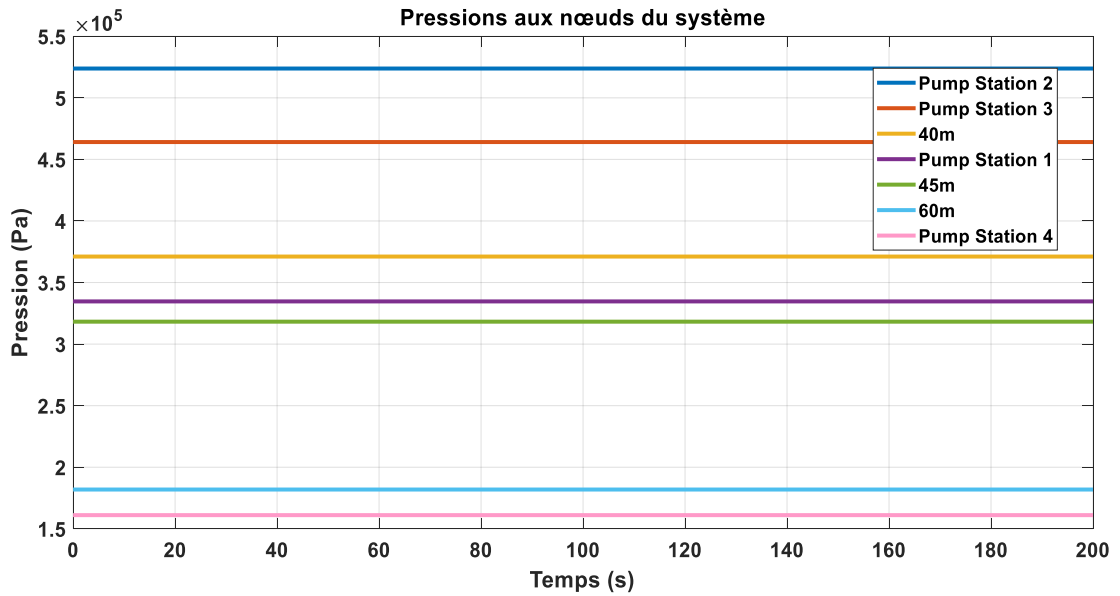


Figure 3.23 Différentes pressions aux nœuds du système de pompage

La figure 3.23 présente les différentes pressions aux nœuds du système de pompage. D’après ces résultats, on observe une petite valeur de pression pour la station N°04 à cause de l’éloignement (distance), ainsi que l’absence du pompage dans cette dernière. Donc la pression du pompage d’eau dépend de la distance et la présence du système de pompage près de réservoir.

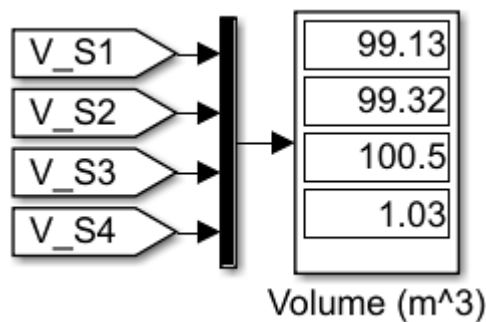


Figure 3.24 Volumes d’eau dans chaque réservoir (en m<sup>3</sup>)

La figure 3.24 montre les volumes d'eau dans chaque réservoir (volume d'eau en m<sup>3</sup>). On remarque une petite valeur du volume d'eau dans le réservoir N°04 (V= 1.03 m<sup>3</sup>) par rapport aux autres, à cause d'une faible pression de pompage (voir figure 3.23). On conclut que le volume d'eau dépend de la pression du pompage.

### **3.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, les résultats de simulation obtenus du système complet de pompage photovoltaïque ont été effectués. On a présenté le convertisseur de type Boost avec la commande MPPT par l'algorithme d'optimisation (P&O) afin d'extraire le maximum de puissance possible fournie par le générateur GPV.

Ensuite un système de pompage d'eau comprend trois stations de pompes a été étudié, le type de la pompe utilisée dans ce système **Pompe centrifuge**, entraîné avec un moteur à courant continu à aimant permanent PMDC.

Les résultats de simulations montrent les performances du système proposé.

# *Chapitre IV*

*Dimensionnement d'un  
système de pompage  
solaire photovoltaïque*

## **4.1 Introduction**

Le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque avec batteries, est la partie nécessaire, pour assurer un bon fonctionnement du système.

Dans ce chapitre, nous présenterons la méthode de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, qui va nous permettre de déterminer le nombre de panneaux nécessaires, de définir la taille des éléments du notre système, ainsi que le nombre de batteries, pour satisfaire les besoins quotidiens en eau d'une grande résidence situé dans une région de la wilaya de Annaba.

## **4.2 Méthode de dimensionnement**

Les différentes étapes de dimensionnement d'un système de pompage sont [38]:

- Evaluation des besoins en eau ;
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire ;
- Prendre compte des données d'ensoleillements ;
- Calcul l'énergie électrique requise pour la pompe ;
- Choix des composants ;

## **4.3 Évaluation des besoins en eau**

La détermination des besoins en eau pour la consommation d'une population donnée dépend essentiellement de son mode de vie. Les besoins en eau nécessaires que nous avons estimés sont 65 litres par personne par jour.

## **4.4 Donnée de base**

Le débit d'eau de la pompe et la hauteur manométrique de pompage sont des données nécessaires pour le dimensionnement de la pompe et de ses composants [39,40].

### **4.4.1 Débit**

Le débit d'eau 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 jour ( $m^3/j$ ).

#### 4.4.2 Hauteur manométrique totale

La 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 suit :

$$\text{HMT} = H_g + P_c \quad (4.1)$$

Avec

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

$P_c = J_a + J_r$  : Perte moyenne de charges et représentant une perte d'énergie dans les conduites d'eau.

$J_r$  : Perte de charges dans les conduites de refoulement.

$J_a$  : Perte de charges dans les conduites d'aspiration.

Elle est calculée par la formule suivante :

$$H_g = H_a + H_r \quad (4.2)$$

$H_a$  : Hauteur d'aspiration.

$H_r$  : Hauteur de refoulement.

$P_c$  : Pertes de charge produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites. Elles s'expriment en mètres d'eau et elles sont fonction de la distance des conduites ( $D$ ), de leur diamètre et du débit de la pompe.

Rabatement : La différence entre le niveau dynamique et le niveau statique.

Rabatement maximal : Rabatement maximal acceptable avant de stopper la pompe.

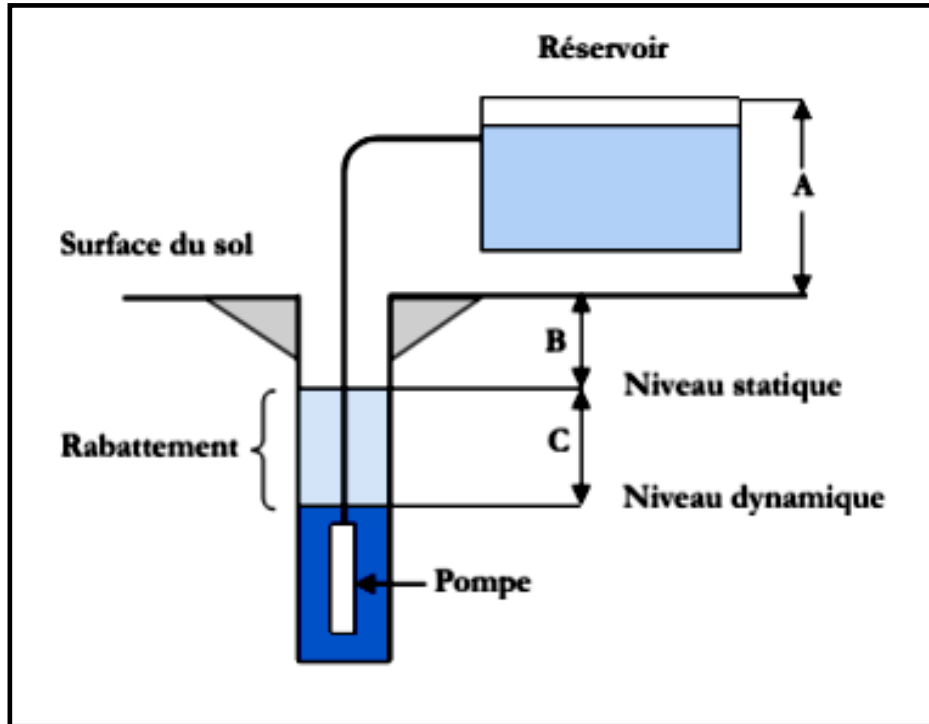


Figure 4.1 Hauteur manométrique total.

#### 4.5 Calcul de l'énergie journalière requise

L'énergie nécessaire pour soulever une certaine quantité d'eau sur une certaine hauteur pendant une journée est calculée à partir des données de débit et de la hauteur manométrique totale requise et s'exprime en watt heure(Wh) [38].

L'énergie hydraulique nécessaire se calcule à partir de la relation suivante :

$$E_h = C_h \times V \times HMT \quad (4.3)$$

Ce calcul est en fonction d'une constante hydraulique ( $C_h$ ) et inversement proportionnel au rendement du groupe motopompe utilisé. [38]

L'énergie électrique requise pour la pompe  $E_{ele}$ :

$$E_{ele} = E_h / \eta_{mp} \quad (4.4)$$

$$E_{ele} = \frac{C_h \times V \times HMT}{\eta_{mp}} \quad (4.5)$$

Ou :

$$C_h = (g \times \rho) / 3600 \quad (4.6)$$

$$C_h = (9.81 \times 10^3) / 3600 = 2.752$$

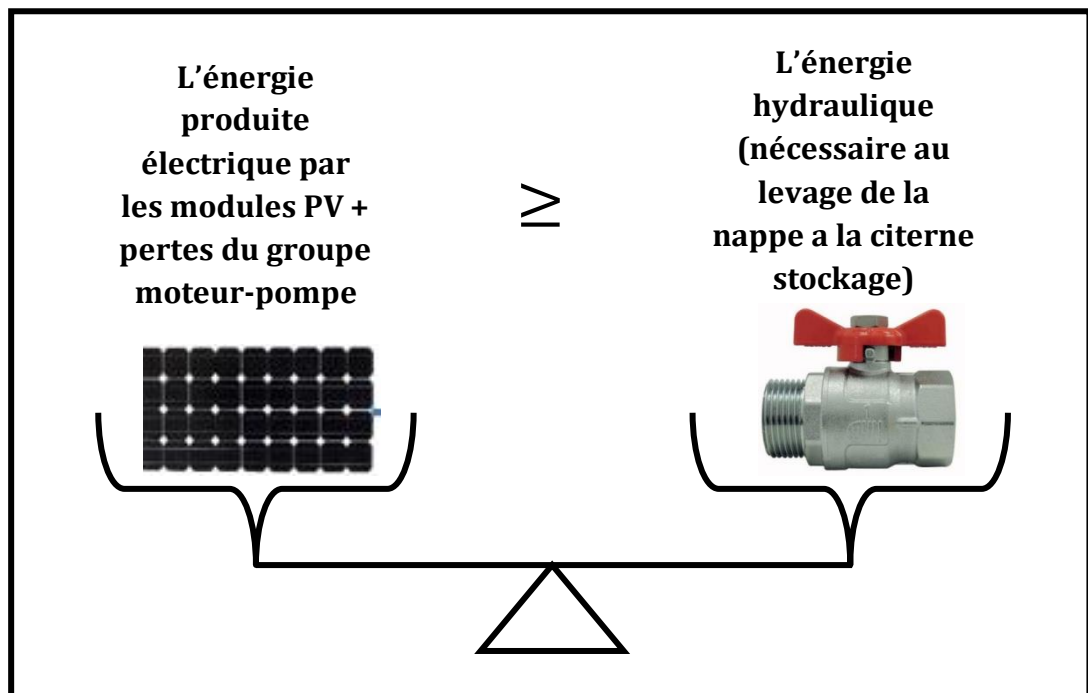
$g$  : Constante de la gravité ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ).

$\rho$  : La densité de l'eau ( $1000 \text{ kg/m}^3$ )

$V$  : Volume quotidien à pomper ( $\text{m}^3/\text{j}$ )

( $\text{nbrdepersonnes} \times \text{quantited'eau par personne}$ ).

$\eta_{mp}$  : Rendement du groupe motopompe.



**Figure 4.2** Organigramme de la balance de l'énergie électrique et l'énergie hydraulique

Pour pouvoir pomper l'eau il faut que l'énergie électrique soit plus grande que l'énergie hydraulique.

## 4.6 Choix des composants du système

### 4.6.1 Dimensionnement de la pompe centrifuge

Dans notre étude le débit journalier crête sera de  $13.5 \text{ m}^3/\text{j}$ , nous allons pomper cette eau d'un puits dont la HMT est estimée à 18m. Le rendement du groupe motopompe est de 40%.

### 4.6.2 Dimensionnement du moteur

Le moteur doit être capable de supporter la puissance crête du champ photovoltaïque.

### 4.6.3 Dimensionnement du champ photovoltaïque

Pour le site d'Annaba, la date du 20 décembre est le mois pertinent où l'ensoleillement est le plus faible, c'est à dire un maximum de 2.8 heures de soleil par jour avec une irradiation solaire de  $2885 \text{ Wh/m}^2$  [41]. En supposant des pertes de 20% attribuables à la température, à la poussière [42], dans ce cas la puissance crête ( $P_c$ ) du champ photovoltaïque se calculera comme suit :

$$P_c = \frac{E_{ele}}{h(\text{nbrheures de soleil par jour}) \times (1 - \text{pertes})} \quad (4.7)$$

Le nombre de panneaux utilisés peut se calculer de la manière suivante :

$$N_{pv} \geq E \left[ \frac{P_c}{P_{pv}} \right]$$

Dans notre travail nous allons utiliser un panneau solaire de type BP SX150s d'une puissance de 150W constitué de 72 cellules en série.



**Figure 4.3** Panneau solaire de 150 Wc

#### 4.6.4 Dimensionnement de la batterie

Le calcul de la capacité ( $C_{batt}$ ) des batteries dépend de plusieurs données, elle peut être calculée comme suit :

$$C_{batt} = \frac{E_{ele} \times N_j}{\eta_{batt} \times U_{batt} \times PDD} \quad (4.8)$$

Le nombre de batteries utilisées peut se calculer de la manière suivante :

$$N_{batt} \geq E \left[ \frac{C_{batt}}{C_{batt,u}} \right]$$

Avec :

$N_j$ : Nombre de jour d'autonomie de la batterie.

$PDD$  : Profondeur de décharge de la batterie.

$\eta_{batt}$ : Rendement de la batterie.

$U_{batt}$ : Tension de la batterie.

$N_{batt}$ : Nombre de batterie.

$C_{batt,u}$ : Capacité unitaire de la batterie.



Figure 4.4 Batterie solaire à GEL 260AH/12V

#### 4.6.5 Régulateur solaire à MPPT

Pour le pompage solaire, le régulateur électronique doit permettre d'obtenir en permanence le meilleur point de fonctionnement de la pompe (MPPT) malgré les variations de l'ensoleillement. Dans la plupart des cas, il permet également de gérer le chargement et le déchargement des batteries en cas de manque d'ensoleillement et la protection des batteries contre la décharge profonde. Nous utilisons un régulateur avec une tension d'entrée de 250V + batterie pour contrôler le chargement et le déchargement de la batterie.



Figure 4.5 Régulateur MPPT 85A 250V

### 4.6.6 Canalisations

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



**Figure 4.6** Tuyau d'alimentation Ø20mm

Dans notre travail, on a pris comme application, l'alimentation en eau d'une grande résidence situé dans une région de la wilaya d'Annaba.

Nous avons établi le tableau de dimensionnement suivant :

**Tableau 4.1** Données de base

Famille	50	Débit	13.5 m <sup>3</sup> /j
Nombre de personne/famille	5	$\eta_{batt}$	90%
Litres/personne/jour	65	$\eta_{mp}$	40%
Nombre d'heure d'ensoleillement	2.8	HMT	18m
Pertes estimées	20%	Nombre de jour d'autonomie	3
Capacité de la batterie	260Ah	Tension de la batterie	12v
Puissance unitaire de panneau	150Wc	PDD de la batterie	80%

## 4.7 Résultats du dimensionnement

Le calcul de besoins en eau, l'énergie hydraulique et électrique quotidienne requise, le nombre de panneaux à utiliser est présenté sur le tableau suivant :

**Tableau 4.2** Tableau des résultats

besoins en eau ( $V$ )	$16.25m^3/j$
Énergie hydraulique nécessaire ( $E_h$ )	797.0625 Wh/jour
Énergie électrique nécessaire ( $E_{ele}$ )	1992.656 Wh/jour
Puissance du champ photovoltaïque	889.579 W
Nombre de panneaux nécessaire ( $N_{pv}$ )	6 panneaux
Capacité des batteries ( $C_{batt}$ )	691.894 Ah
Nombre de batteries ( $N_{batt}$ )	3 batteries

Vu les caractéristiques du moteur utiliser ( $P_n=746W$ ,  $I_n=3.4A$ ), les panneaux doivent être branchés en série.

La tension à la sortie du générateur photovoltaïque totale sera:

$$V_{pvtot} = N_{pv} \times V_{mp}$$

$$V_{pvtot} = 6 \times 34.5 \text{ V} = 207 \text{ V}$$

Le courant à la sortie du générateur photovoltaïque sera :

$$I_{pvtot} = \frac{P_c}{V_{pvtot}} = \frac{889.576}{207} = 4.297A$$

## 4.8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré sur la description de la méthode de dimensionnement d'un système de pompage solaire photovoltaïque. Ce dimensionnement a été effectué pour une grande résidence situé dans une région de la wilaya d'Annaba.

Pour un besoin journalier en eau de  $16.25 m^3$ , nous avons besoin d'un champ photovoltaïque de 889.579 W avec six panneaux et trois batteries de capacité de 260 AH.

# *Conclusion générale*

## **Conclusion générale**

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

Pour une optimisation de l'énergie délivrée par le générateur photovoltaïque. La technique de poursuite de puissance maximale MPPT est très utile. Pour notre cas, nous utilisons la commande MPPT de type perturbation et observation (PO).

Le système complet de pompage photovoltaïque a été simulé sous l'environnement MATLAB/*Simulink*, les résultats obtenus montrent les performances du système proposé. Ce système peut être dimensionné pour des applications de puissances allant de quelques Watt à quelques Mégawatt.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant (électricité propre), silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu ce qui rend notre système de pompage très adaptable.

Nous pouvons proposer comme perspectives suivantes :

- La réalisation de ce projet en pratique dans le sud algérien pour des raisons d'applications en agriculture.
- Munir ce système de pompage avec une carte de commande MPPT avec poursuite du soleil et organisation de l'opération du pompage pour améliorer le rendement de l'installation du pompage solaire.

# *Références*

## *Références*

- [1] D. BOUKHERS « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage » Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2007.
- [2] <http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/371.htm>
- [3] K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivié « Conception et modélisation d'un système Photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique » Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007).
- [4] A. BOUDJADA, " Modélisation et simulation d'un système pompage photovoltaïque", Mémoire de Master Université Constantine1, Juin 2011.
- [5] H. MESSAOUDENE, "Détermination intelligente de la puissance maximale des modules photovoltaïques ", Mémoire de Magister Université El HADJ LAKHDAR Batna, 2013/2014.
- [6] M. PETIBON Stéphane, " Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ", Mémoire de Doctorat Université de Toulouse, 20 Janvier 2009.
- [7] H. KADRAOUI, "étude comparatif et rendement énergétique des différents degrés de concentration des convertisseurs thermodynamique de l'énergie solaire ", mémoire de Magister université ABOU–BAKR BELKAID –Tlemcen, 2010/2011.
- [8] T. BOUGUERRA, " Optimisation d'un système photovoltaïque : Application en continu et en alternatif ", mémoire de Magister, UNIVERSITE Mentouri de Constantine 1, 30/06/2014.
- [9] K. HELALI, Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative", mémoire de Magister université de MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou, 25 Juin 2012.
- [10] M. Djarallah "Contribution a l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couples au réseau électrique," Univ. de Batna, Thèse de Doctorat en Science, 2008.
- [11] Bensaci wafa « modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapte par une commande MPPT », thèse master en génie électrique université de Ouargla 2011.
- [12] GUIDENR photovoltaïque L'information: «[www.photovoltaique.guidner.fr](http://www.photovoltaique.guidner.fr)»

- [13] Energie & Développement : «[www.energie-developpement.blogspot.fr](http://www.energie-developpement.blogspot.fr)»
- [14] A. BELHOCINE et S. ZAIDI « Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome » Mémoire de Master2. Université de Bejaïa, 2012.
- [15] « L'eau en Algérie », Université Mentouri Constantine. Disponible : [http://www.umc.edu.dz/vf/index.php/actualites-et-informations/theme-de-la-semaine/980-leau-en - Algérie](http://www.umc.edu.dz/vf/index.php/actualites-et-informations/theme-de-la-semaine/980-leau-en-Algerie).
- [16] « Agence bassin hydrographique Algérois- Hodna-Soummam », 2007.
- [17] F. KALAJDI et N. CHEKROUNI, " Commande d'un générateur photovoltaïque débitant sur une pompe (MPPT) ", Université ABOU BAKR BELKAID, 2013/2014.
- [18] K. HELALI, " Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative", Mémoire de Magister université de MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou, 25 Juin 2012.
- [19] S. AOUI, "Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque", Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS -SETIF-1, 28/09/2014.
- [20] S. BENSALAM, " Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires", Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS-SETIF-1, 06/01/2011.
- [21] F. HEROGUEL, "les cellules photovoltaïques," École Normale Supérieure, Lyon Epreuve de projet, 2007.
- [22] M.S. FATEH, " Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique", Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS-SETIF
- [23] J.Royer, T.Djiako, E.Schiller et B.S.Sy, "Le pompage photovoltaïque manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens", université d'otatawa, 1998.
- [24] Mohamad Koteich. "Modélisation et observabilité des machines électriques en vue de la commande sans capteur mécanique". Automatique / Robotique. Université Paris-Saclay, 2016. Français .
- [25] B. Azoui, M. Chabane. "Expérimentation D'un Moteur A Aimants Permanents Sans Balais Collecteur Dans Un Système De Pompage Photovoltaïque", ICEL`2000, U.S.T.Oran, Algeria, pp:378-383.
- [26] Solar pumping for village water supply systems Training Manual For technicians, designers and managers , practica fountation 2017.

- [27] Jimmy Royer Thomas Djiako Eric Schiller Bocar Sada Sy "LE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE" Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens Université d'Ottawa 1998.
- [28] <https://www.castlepumps.com/info-hub/>
- [29] R. Chenni « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2007.
- [30] M. T. BOUKADOUM, A. HAMIDAT et N. OURABIA «Le Pompage Photovoltaïque», Revue des Energies Renouvelables. : Zones Arides pp (69- 73) ,2002
- [31] ZAABOUB Fatima, «Etude et simulation d'un générateur photovoltaïque connecté au réseau électrique et doté d'un FAP», Mémoire de Master en Electrotechnique, Option : Énergie et Réseaux Électriques, Université LARBI BEN M'HIDI, Oum EL Bouaghi, Promotion : 2016/2017.
- [32] D. Sera, R. Teodorescu, T. Kereke,. «Teaching maximum power point trackers using a photovoltaic array model with graphical user interface». In states of energy technology, 101DK- 9220, Aalborg, Denmark. 2013.
- [33] J.-P. Ferrieux and F. Forest. Alimentations à découpage – Convertisseurs `à résonance. MASSON, second Edition, 1994.
- [34] Z. Ayache «Commande MPPT et Contrôle d'un système Photovoltaïque par la logique floue », université Djilali Liabès sidi Bel Abbès 22000, Alegria.
- [35] Thanh Phu Nguyen, solar panel maximum power point tracker, Undergraduate Thesis The University of Queensland Department of Computer Science & Electrical Engineering, 19 October 2001
- [36] AMGHAR Bilal, «Modélisation, observabilité et commande de convertisseurs multicellulaires parallèles dans un environnement dédié», Thèse de Doctorat en Automatique et Électrotechnique, École Doctorale Cergy Pontoise, Soutenue le 1 Juillet 2013.
- [37] MESSAS Rabah et OURCHANE Mokhtar, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique », Mémoire de Master en Génie électrique, Option: Automatique des systèmes de production, Université DJILALI BOUNAAMA - KHEMIS MILIANA, Année Universitaire 2015/2016
- [38] A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi, « Dimensionnement du système de pompage photovoltaïque», Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Bouzaréah, Alger 2 Faculté de Génie Electrique, U.S.T.H.B., B.P. 32, El-Alia, Bab-Ezzouar, Alger.

- [39] B.hamidat, B.benyoucef « Mathematic models of photovoltaic motor-pump systems»  
Renewable Energy Vol: 33, pages: 933-942, 2008.
- [40] D.Rekioua, A. hamidat, K. Haddouche, L.Katti « Dimensionnement d'un système de  
pompage photovoltaïque», colloque nationale sur l'énergie Solaire, CNESOL'2006,  
Université de Bejaia, 29-30 Novembre 2006.
- [41] <https://www.cder.dz/spip.php?article3526>
- [42] S. Bensmail «Contribution à la modélisation et l'optimisation des systèmes  
photovoltaïques», Mémoire de Magister, université de BEJAIA, 2012.

## **Résumé**

L'énergie solaire photovoltaïque est de plus en plus utilisée pour opérer plusieurs applications terrestres comme le pompage d'eau. En effet dans les pays en voie de développement, la demande en eau est très forte avec parallèlement en une disponibilité en rayonnement solaire.

Le système de pompage d'eau PV le plus simple se compose d'un générateur PV, d'un convertisseur élévateur (Boost), d'un moteur à courant continu à aimant permanent PMDC et d'une pompe de type centrifuge. Le travail, dans ce mémoire, concerne l'étude d'une chaîne de pompage solaire photovoltaïque. Pour que le système photovoltaïque fonctionne à sa puissance maximale, un étage d'adaptation associé à un algorithme MPPT est utilisé. Les résultats obtenus montrent l'efficacité du système proposé.

### **Mots-clés :**

Photovoltaïque, Contrôle MPPT, Convertisseur DC/DC, Pompe centrifuge, Moteur PMDC, Simulation.

## **Abstract**

Photovoltaic solar energy is increasingly being used to operate several land-based applications such as water pumping. Indeed, in developing countries, the demand for water is very high with a parallel availability of solar radiation.

The simplest PV water pumping system consists of a PV generator, a boost converter, a permanent-magnet DC motor PMDC and a centrifugal-type pump. The work in this project concerns the study of a photovoltaic solar pumping chain. To ensure that the photovoltaic system operates at maximum power, an adaptation stage combined with an MPPT algorithm is used. The results obtained show the efficiency of the proposed system.

### **Key-words :**

Photovoltaic, MPPT Control, DC/DC Converter, Centrifugal Pump, PMDC Motor, Simulation.

## ملخص

تستخدم الطاقة الشمسية الضوئية بشكل متزايد لتشغيل العديد من التطبيقات كمثال عملية ضخ المياه. والواقع أن الطلب على المياه في البلدان النامية مرتفع للغاية، مع توفر الإشعاع الشمسي بشكل موز.

يتكون أبسط نظام لضخ المياه الكهروضوئية من مولد كهروضوئي PV، محول تصعيد Boost، محرك تيار مستمر مزود بمغناطيس دائم PMDC، ومضخة من النوع الطارد المركزي. يتعلق العمل في هذه الأطروحة بدراسة سلسلة ضخ المياه عن طريق الطاقة الشمسية الكهروضوئية. ولكي يعمل النظام الضوئي بأقصى طاقة له، يتم استخدام مرحلة التكيف المرتبطة بخوارزمية MPPT. تبين النتائج التي تم الحصول عليها فعالية النظام المقترح.

### الكلمات المفتاحية :

الكهروضوئية ، تحكم MPPT ، محول DC / DC ، مضخة طرد مركزي ، محرك PMDC ، محاكاة.