

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



*Centre universitaire SALHI AHMED –Naâma-*  
*Institut des Sciences et Technologies*  
*Département de Technologie*



**PROJET DE FIN D'ETUDE**  
**POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER**

*Filière : Energies renouvelables*

*Spécialité : Energies renouvelables en Electrotechnique*

**Présenté par :**

- **.KADDOUR Yacine**
- **.DERBAL Oussama**

***Intitulé***

**Modélisation et simulation d'un pompage  
photovoltaïque**

**Soutenu devant le jury :**

- |                             |            |                  |
|-----------------------------|------------|------------------|
| ➤ <b>M.AIMER amer fethi</b> | <b>MCB</b> | <b>Président</b> |
| ➤ <b>M.BRAHIMI Mohammed</b> | <b>MCB</b> | <b>Examineur</b> |
| ➤ <b>M.KHESSAM Medjdoub</b> | <b>MCB</b> | <b>Encadreur</b> |

**Année Universitaire : 2019/2020**

# DEDICACE

*Pour chaque début il y a une fin, et ce que est beau dans toute fin c'est la réussite et l'atteinte du but.*

*Je dédie ce modeste travail, fruits de très longues années d'études à :*

*Ce qui méritent le plus ma reconnaissance, ma gratitude et mon grand amour, ce qui m'ont apporté toujours soutien et bonheur dans la vie :*

*Pour toi très chère mère, pour toi très respectueux père, vous les plus chères de mon cœur, vous qui m'aviez entouré de nobles sentiments et vous êtes la source de mon courage et mon inspiration*

*Pour les plus belles choses dans ma vie : mes chères Hanane et Djana*

*Pour vous très chères mes frères : Hichem Aymen Amine et Islam*

*A toutes mes chères amies qui ont montrés le sens de l'amitié : el fazachich Krimo, cheikh, Abdou et Diaà, ainsi que tous mes amis sans exception.*

*A mon binôme Oussama qui a toujours été présents et qui n'a ménagé aucun effort pour la réalisation de ce modeste travail avec ses suggestions et ses idées surprenantes*

*A ma grande famille : KADDOUR*

*A tous les enseignants et les étudiants de la promotion 2020 énergie renouvelable en électrotechnique*



*Yacine KADDOUR*

# DEDICACE

*Pour chaque début il y a une fin, et ce que est beau dans toute fin c'est la réussite et l'atteinte du but.*

*Je dédie ce modeste travail, fruits de très longues années d'études à :*

*Ce qui méritent le plus ma reconnaissance, ma gratitude et mon grand amour, ce qui m'ont apporté toujours soutien et bonheur dans la vie :*

*Pour toi très chère mère, pour toi très respectueux père, vous les plus chères de mon cœur, vous qui m'aviez entouré de nobles sentiments et vous êtes la source de mon courage et mon inspiration*

*Pour les plus belles choses dans ma vie : mes chères ikram et nour el houda*

*Pour vous très chères mes frères :*

*Abdelhamid iliasse adam et mouhamed*

*A toutes mes chères amies qui ont montrés le sens de l'amitié : medjdoub, hakim, amine et yasser, ainsi que tous mes amis sans exception.*

*A mon binôme Yacine qui a toujours été présents et qui n'a ménagé aucun effort pour la réalisation de ce modeste travail avec ses suggestions et ses idées surprenantes*

*A ma grande famille : Derbale*

*A tous les enseignants et les étudiants de la de la promotion 2020 énergie renouvelable en électrotechnique*

*Oussama Derbale* 

# Remerciements

*Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah, tout puissant de nos avoir donné la force et le courage pour terminer ce modeste travail.*

*Nous remercions vivement l'enseignant KH'ESSAM Medjdoub Notre encadreur, pour son aide, ses conseils précieux et critique pertinentes qu'il nous a apportés durant la réalisation de ce mémoire.*

*Nous remercions aussi tous SAADA Zakariya et BELABED Zakariya .*

*Remercions également toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.*

*Nous adressons aussi nos remerciements à tous nos enseignants et à tous nos collègues de notre promotion*

*Yacine et Oussama*

# Liste des contenus

Titre	page
Dédicace	I
Remerciements	II
Liste des contenus	III
Liste des figures et des tableaux	IV
Liste des abréviations	V
Sommaire	VI
Introduction générale	01
<b>Chapitre I : généralité sur les systèmes de pompage photovoltaïque</b>	
I.1 Le pompage photovoltaïque	03
I.2 Configuration typique d'un système de pompage photovoltaïque	06
I.3 Description des différents composants d'un système de pompage PV	08
<b>Chapitre II : Modélisation des éléments du système de pompage photovoltaïque</b>	
II.1 Modélisation du générateur photovoltaïque	27
II.2. Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge	32
II.3 Modélisation du convertisseur statique DC/DC	33
II.4 Modélisation de l'onduleur de tension à MLI	35
II.5 Modélisation du moteur asynchrone	37
II.6 Modélisation de la pompe centrifuge	39
<b>CHAPITRE III : commande du système de pompage photovoltaïque</b>	
III.1 Les étapes de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque	41
III.2 La commande du point de puissance maximum	44
III.3 Modélisation du bus continu	46
<b>Chapitre IV : Simulation du pompage photovoltaïque</b>	
IV.1 logiciel de la simulation MATLAB/SIMULINK 2011	48
IV.2 Fonctionnement de générateur photovoltaïque à sa puissance maximale	48
IV.3. Simulation du système de pompage photovoltaïque connecté au générateur photovoltaïque	48
Conclusion générale	57
Références et bibliographie	VII
Annexe	VIII

## Liste des abréviations

**MPPT:** Maximum power point Tracking

**DC:** Direct courant

**AC:** Alternative courant

**GPV:** Générateur photovoltaïque

**MAS:** Machine à asynchrones

**MLI:** Modulation de largeur d'impulsion

**$K_i$ :** Coefficient de température du court-circuit de la cellule (Ampères / K)

**$T_c$ :** Température de la cellule en Kelvin

**$G$  :** L'éclairement absorbe par la cellule

**$G_{ref}$  :** L'éclairement de référence (1000 w/m<sup>2</sup>)

**$I_0$  :** Courant de saturation de la diode

**$V_t$  :** Tension thermique

**$B$  :** Facteur d'idéalité

**$K$  :** Constant de Boltzmann (1,38\*10<sup>-23</sup> J/K)

**$q$  :** Charge de l'électron (1,6\*10<sup>-19</sup> C)

**$I_{pv}$  :** Courant délivré par la photopile.

**$I_{ph}$  :** Photo courant.

**$I_d$  :** Courant de la diode.

**$I_{Rsh}$  :** Courant shunt

**$I_{cc}$  [A] :** Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur).

**$K_i$  [A/K] :** Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau.

**$T$  [K] :** Température ambiante.

**$G$  [W/m<sup>2</sup>] :** Irradiation sur la surface de la cellule.

**$T_{ref}$  [K] :** Température de référence (298.15 K).

**$G_{ref}$  [W/m<sup>2</sup>] :** Irradiation de référence (1000 W/m<sup>2</sup>).

**$E_g$  [eV] :** Énergie de gap du semi-conducteur (1.1 eV pour le silicium poly cristallin à 25°C).

**$A$  :** Constante d'idéalité de la jonction (1 < A < 2).

**$V_{co}$  [V] :** Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur).

**$N_s$  :** Nombre de cellules connectées en série dans un module.

**$N_p$  :** Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module.

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

## Liste des abréviations

**$K_r$**  : Un coefficient de proportionnalité [ $(\text{Nm}/\text{rad} \cdot \text{S}^{-1})^2$ ]

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

**$\Omega_n$**  : vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s).

**$N_{sq}$**  : Vitesse spécifique du rotor

**$N_{ep}$**  : Nombre d'étages de la pompe

**$H$**  : hauteur de charge effective en m

**$g$**  : L'accélération de la pesanteur = 9.81 N/s<sup>2</sup>

**$\omega$**  : vitesse de l'arbre en rad/s

**$Q$**  : débit de la pompe en l/s

**$D_f$**  : Diamètre du forage (ou du puits) en dm

**$K_{sp}$**  : Constante

**$N$**  : vitesse de l'arbre du rotor en tr/min

**$C_r$**  : Couple résistant

**$E_{ele}$**  : Habituellement exprimé en KWh.

**$Q$**  : Débit journalier ( $\text{m}^3/\text{jour}$ )

**HMT** : Hauteur manométrique.

**$R_p$**  : En général le rendement des groupes motopompes est de 30% et 45%, selon le type de pompe et de moteur.

**$g$**  : Constante de gravité (9.81  $\text{m}/\text{S}^{-1}$ ).

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

**$I_{cd}$**  : désignent le courant circulant dans la capacité de filtrage  $C_d$ .

**$i_{as}$** ,  **$i_{bs}$**  et  **$i_{cs}$**  sont des courants statoriques de la machine.

**$V_{ao}$** ,  **$V_{bo}$** ,  **$V_{co}$** , sont les tensions à l'entrée de l'onduleur (continues).

**$V_{ab}$** ,  **$V_{bc}$**  et  **$V_{ca}$**  sont Les tensions composées.

**$V_{an}$** ,  **$V_{bn}$** , et  **$V_{cn}$**  sont les tensions de phase de la charge.

# Liste des figures et des tableaux

## Liste des tableaux

<b>Tableau (I.1):</b> Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique.....	24
<b>Tableau (IV-1):</b> Caractéristiques électriques du module PV.....	49

## Liste des figures

<b>Figure (I.1):</b> structure d'un système de pompage photovoltaïque.....	03
<b>Figure(I.2):</b> Principe de fonctionnement du pompage au fil du soleil.....	04
<b>Figure (I.3):</b> Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil.....	04
<b>Figure (I.4):</b> Caractéristiques du débit pour le pompage PV avec batterie.....	05
<b>Figure (I.5):</b> principaux composants du système de pompage Photovoltaïque avec batteries.....	05
<b>Figure (I.6):</b> Systèmes de petite puissance.....	07
<b>Figure(I.7):</b> schéma qui représente les différents composants d'un système photovoltaïque.....	08
<b>Figure (I.8):</b> conversion de l'énergie solaire en électricité.....	09
<b>Figure (I.9):</b> Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	10
<b>Figure (I.10):</b> Structure basique d'une cellule solaire.....	11
<b>Figure (I.11):</b> Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule Photovoltaïque.....	12
<b>Figure (I.12):</b> Convertisseur DC-DC.....	15
<b>Figure (I.13):</b> Hacheur dévolteur.....	15
<b>Figure (I.14):</b> Hacheur survolteur.....	16
<b>Figure (I.15):</b> Circuit de l'onduleur relié à la machine.....	17
<b>Figure (I.16):</b> schéma synoptique d'un M.L.I.....	18
<b>Figure (I.17):</b> M.L.I à échantillonnage naturel.....	19
<b>Figure (I.18):</b> Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge.....	23
<b>Figure (I.19):</b> Caractéristiques d'une pompe volumétrique.....	23
<b>Figure (II-1):</b> Modèle d'une cellule photovoltaïque idéale.....	27
<b>Figure (II-2):</b> Modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode.....	28
<b>Figure (II.3):</b> Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ dans les conditions standards de fonctionnement.....	30

# Liste des figures et des tableaux

---

<b>Figure (II.4):</b> Caractéristique courant –tension et puissance –tension d’un module photovoltaïque pour différent niveau d’irradiation ( $G=400, 600, 800, 1000 \text{ W/m}^2$ ) à $T_c=25^\circ\text{C}$ .....	31
<b>Figure (II.5):</b> Caractéristique puissance –tension et courant –tension d’un module photovoltaïque pour une variation de température ( $T_c =0, 25, 50, 75^\circ\text{C}$ ) à $G = 1000\text{W/m}^2$ .....	32
<b>Figure(II.6):</b> Etage d’adaptation entre un GPV et une charge.....	33
<b>Figure (II.7):</b> Convertisseurs DC-DC.....	33
<b>Figure (II.8):</b> Montage Boost.....	33
<b>Figure (II.9):</b> Circuit de l’onduleur relié à la machine.....	35
<b>Figure (III.1):</b> Irradiation globale moyenne mensuelle journalière sur plan horizontal du site de Bejaïa de 1998 à 2007.....	42
<b>Figure (III.2):</b> caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d’un panneau solaire.....	44
<b>Figure (III.3):</b> Diagramme fonctionnel algorithme "perturbation et observation".....	45
<b>Figure (III.4):</b> schéma équivalent des éléments interconnectés au bus continu.....	46
<b>Figure(IV.1):</b> Schéma Simulink du module solaire.....	48
<b>Figure (IV.2):</b> Caractéristique $P(V)$ d’un panneau.....	49
<b>Figure (IV.3):</b> Caractéristique $P(V)$ d’un panneau.....	49
<b>Figure (IV.4):</b> Courbes d’interaction du signale de la porteuse triangulaire avec les tensions de référence ( $V_a, V_b, V_c$ ).....	50
<b>Figure (IV.5):</b> Courbes des tensions composées MLI.....	51
<b>Figure (IV.6):</b> Courbes des tensions simple MLI.....	51
<b>Figure (IV.7):</b> Schéma Simulink de l’onduleur MLI.....	52
<b>Figure (IV.8):</b> Courbe de la variation de vitesse $W(\text{rad/s})$ en charge en fonction de temps...	52
<b>Figure (IV.9) :</b> Courbe de la variation du couple moteur( $C_{em}$ ) en fonction de temps.....	53
<b>Figure (IV.10):</b> Courbe la variation du flux ( $\Phi_{rq}$ ) en fonction de temps.....	53
<b>Figure (IV.11):</b> Courbe de variation du courant statorique ( $I_{ds}$ ) en fonction de temps.....	54
<b>Figure (IV.12):</b> Courbe de La variation du courant statorique ( $I_{qs}$ ) en fonction de temps.....	54
<b>Figure (IV.13):</b> Courbe de La variation du débit de la pompe en fonction de temps.....	55
<b>Figure (IV.14):</b> Schéma Simulink de la machine.....	55
<b>Figure (IV.15):</b> Schéma Simulink de la pompe avec les caractéristiques Q-H.....	56

## Liste des figures et des tableaux

---

<b>Figure (IV.16):</b> Schéma Simulink de la pompe avec les caractéristiques H.....	56
<b>Figure (IV.17):</b> Schéma Simulink de la pompe avec les caractéristiques Ich-V.....	56
<b>Figure (IV.18) :</b> Schéma complet de l'installation réalisée de pompage PV.....	57

# SOMMAIRE

Dédicace.....	I
Remerciement.....	II
Liste des contenus.....	III
Liste des figures des tableaux.....	IV
Liste des abréviations.....	V
Introduction générale.....	01

## Chapitre I : généralité sur les systèmes de pompage photovoltaïque

Introduction.....	03
I.1 Le pompage photovoltaïque.....	03
I.1.1 Le pompage au fil du soleil.....	03
I.1.2 Le pompage avec batterie .....	05
I.2 Configuration typique d'un système de pompage photovoltaïque.....	06
I.2.1 Systèmes de petite puissance (50-400W) .....	06
I.2.2 Les systèmes de moyenne puissance (400-1500 W) .....	07
I.3 Description des différents composants d'un système de pompage PV .....	08
I.3.1 Généralité sur l'énergie photovoltaïque .....	08
I.3.1.1 Histoire du photovoltaïque .....	08
I.3.1.2 La conversion de la lumière en électricité.....	09
I.3.1.3 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque.....	10
I.3.1.4 Caractéristique du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	11
I.3.1.5 Technologie des cellules photovoltaïque .....	12
I.3.1.6 Avantages et inconvénients du photovoltaïque .....	13
I.3.1.7 Le module photovoltaïque .....	13
I.3.1.8 Générateur photovoltaïque .....	14

# SOMMAIRE

---

I.3.1.9 Protection des modules photovoltaïques.....	14
I.3.1.10 Les différents systèmes photovoltaïques .....	14
I.3.2 Les convertisseurs statiques DC/DC .....	14
I.3.2.1 Hacheur dévolteur .....	15
I.3.2.2 Hacheur survolteur .....	16
I.3.3 Convertisseur DC/AC (Onduleur) .....	16
I.3.3.1 La commande de l'onduleur:.....	17
I.3.3.1.1 Généralité :.....	17
I.3.3.1.2 Contrôle du courant par M.L.I :.....	18
I.3.3.1.3 MLI à échantillonnage naturel :.....	19
I.3.4 Commande MPPT .....	19
I.3.5 Groupe moteur-pompe .....	20
I.3.5.1 Moteurs .....	20
I.3.5.2 Pompes .....	22
I.3.5.2.1 Les pompes centrifuges :.....	22
I.3.5.2.2 Les pompes volumétriques :.....	23
I.3.5.2.3 Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique :.....	24
I.4 Structure du système de pompage a étudié .....	25
Conclusion .....	26

## Chapitre II : Modélisation des éléments du système de pompage photovoltaïque

Introduction.....	27
II.1 Modélisation du générateur photovoltaïque.....	27
II.1.1 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque.....	27

# SOMMAIRE

II.1.2 Caractéristique courant-tension d'un module .....	30
II.1.2.1 Influence de l'irradiation .....	30
II.1.2.2 Influence de la température .....	31
II.2. Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge.....	32
II.3 Modélisation du convertisseur statique DC/DC [.....	33
II.4 Modélisation de l'onduleur de tension à MLI .....	35
II.5 Modélisation du moteur asynchrone .....	37
II.6 Modélisation de la pompe centrifuge .....	39
Conclusion .....	40

## Chapitre III : commande du système de pompage photovoltaïque

Introduction.....	41
III.1 Les étapes de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque.....	41
III.1.1 Evaluation des besoins en eau .....	41
III.1.2 calcul de l'énergie électrique quotidienne requise .....	41
III.1.3 Détermination de l'énergie solaire disponible .....	42
III.1.3.1 Inclinaison et orientation optimale des capteurs photovoltaïques .....	42
III.1.3.2 Mois de dimensionnement.....	42
III.1.4 Choix des composantes de système.....	43
III.1.4.1 Dimensionnement de la pompe centrifuge.....	43
III.1.4.2 Dimensionnement du champ photovoltaïque.....	43
III.2 La commande du point de puissance maximum (Maximum Power Point Tracking).....	44
III.2.1 Méthode « Perturbation et Observation » .....	44

# SOMMAIRE

---

<b>III.3 Modélisation du bus continu .....</b>	<b>46</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>47</b>

## Chapitre IV : Simulation du pompage photovoltaïque

<b>Introduction.....</b>	<b>48</b>
<b>IV.1.logiciel de la simulation MATLAB/SIMULINK 2011 .....</b>	<b>48</b>
<b>IV.2.Fonctionnement de générateur photovoltaïque à sa puissance maximale.....</b>	<b>48</b>
<b>IV.3. Simulation du système de pompage photovoltaïque connecté au générateur photovoltaïque.....</b>	<b>50</b>
<b>Conclusion :.....</b>	<b>57</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>58</b>
<b>Références et bibliographie.....</b>	<b>VII</b>
<b>Annexe.....</b>	<b>VIII</b>

A hand with a finger pointing towards a glowing blue circuit board. The circuit board is dark with intricate white and blue traces. The finger is positioned over a bright blue, glowing section of the circuit. The background is dark, and the overall lighting is blue and futuristic.

# **Introduction générale**

### Introduction générale :

La généralisation de l'utilisation de l'électricité, la consommation énergétique n'a cessé d'augmenter, le problème de la conversion et du stockage de l'énergie a conduit à la recherche et au développement de nouvelles sources d'approvisionnement. Tous les jours, le soleil fournit de l'énergie à la terre. Les consommateurs peuvent utiliser cette énergie gratuite grâce à une technologie appelée photovoltaïque, qui transforme l'énergie solaire en électricité [SIT1].

L'énergie photovoltaïque est largement utilisée pour l'alimentation des régions isolées ou désertées (éclairage, charge des batteries, pompes, ...etc.). Le grand avantage est que cette source est inépuisable, elle offre une grande sécurité d'utilisation et elle est propre [MOU01].

Le pompage photovoltaïque est l'une des applications prometteuses de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque [MEF12]. Le pompage d'eau est un facteur important dans le développement des zones rurales et isolées des pays en développement. L'utilisation de système de pompage photovoltaïque (PV) pour l'exhaure de l'eau dans ces zones s'avère une solution très fiable à condition d'être bien dimensionner. Le dimensionnement des systèmes PV, en particulier ceux de pompage d'eau, nécessite l'utilisation de modèle qui reflète la réalité et ils se doivent d'être précis [BAK12].

Actuellement, deux systèmes de pompage photovoltaïque sont utilisés, avec et sans batteries [KAT11]. Mais le système qu'on a choisi est au fil du soleil ce procédé consiste à pomper l'eau tant que le soleil est présent vers un réservoir qui assure la régulation de la consommation. Ainsi, le consommateur peut être alimenté même la nuit et pendant les journées nuageuses. L'eau pompée peut être employée dans beaucoup d'applications, telles que l'utilisation domestique et l'irrigation.

Le système largement utilisé est celui dit au 'fil du soleil'. Ce système est le plus simple puisque l'énergie photovoltaïque est utilisée directement à partir des panneaux. La pompe ne fonctionnera qu'en présence de la lumière et dès que l'éclairement sera suffisant elle atteint la puissance demandée. La particularité des pompes solaires installées au fil du soleil est que les caractéristiques (débit, pression, rendement) sont en fonction de l'éclairement qui varie au cours de la journée et au cours des saisons [AMM12].

La première partie de ce travail correspond à une recherche bibliographique sur les systèmes de pompage photovoltaïque. Nous allons présenter les différentes parties des constituants, à savoir, la source photovoltaïque, ou une description de son principe de fonctionnement ainsi que ces avantages et inconvénients seront présentés. Ensuite, nous présenterons les convertisseurs statiques utilisés et le groupe motopompe. A la fin de ce chapitre, nous présenterons la structure du système de pompage photovoltaïque qui fera l'objet d'étude, de modélisation de commande et de simulation.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de chaque élément qui constitue le système à savoir le générateur photovoltaïque, les convertisseurs statiques, les moteurs asynchrones à cage d'écureuil et la pompe centrifuge.

Dans le troisième chapitre, nous avons dimensionné les différents composants du système de pompage PV, à savoir la pompe centrifuge et son moteur asynchrone d'entraînement, Ainsi que le nombre de panneaux nécessaire pour satisfaire les besoins en eau d'irrigation. Aussi on a défini la commande a utilisé dans notre

## Introduction générale :

---

système PV, la commande MPPT «P&O » du convertisseur (DC-DC) pour obtenir le point de puissance maximale du GPV

Le quatrième est consacré à la simulation du système de pompage photovoltaïque. Enfin on terminera notre travail par une conclusion générale, dans laquelle, nous ferons une synthèse récapitulative du travail présenté.



## **Chapitre I**

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

## Introduction :

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. Le pompage photovoltaïque (PV) représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent. [HAD05]

Actuellement, deux systèmes de pompage photovoltaïque sont utilisés, avec et sans batteries. La technologie sans batteries a quelques inconvénients, son principal défaut est d'avoir un débit d'eau qui dépend de l'ensoleillement au cours de la journée.

### I.1 Le pompage photovoltaïque :

Généralement, les systèmes de pompage photovoltaïque sont constitués d'un générateur photovoltaïque, un sous-système de pompage et un réservoir d'eau (Figure I.1).

Sous le terme générale pompe, différentes applications sont regroupées les différences entre les type de pompage photovoltaïque résident dans la source d'où provient l'eau (rivière, puits, forage...), On distingue deux types de systèmes de pompage photovoltaïques :

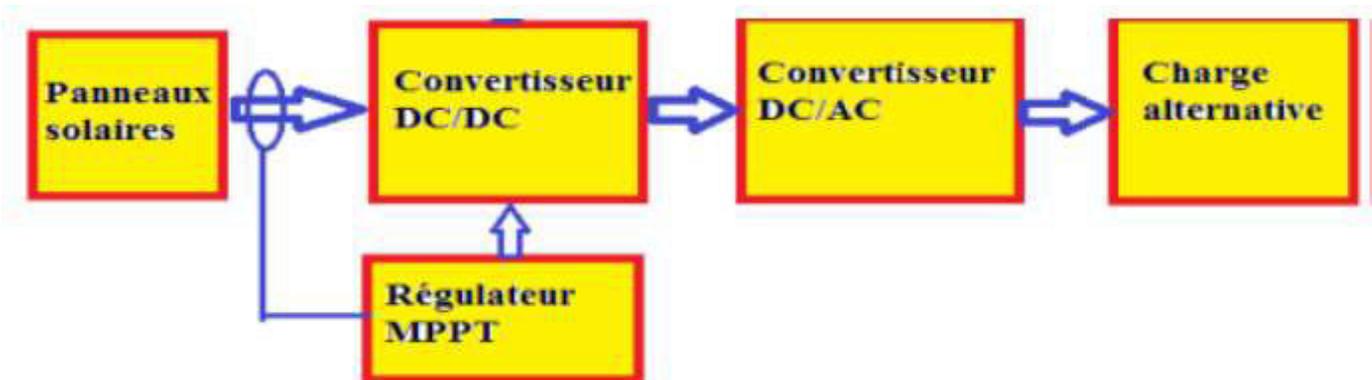
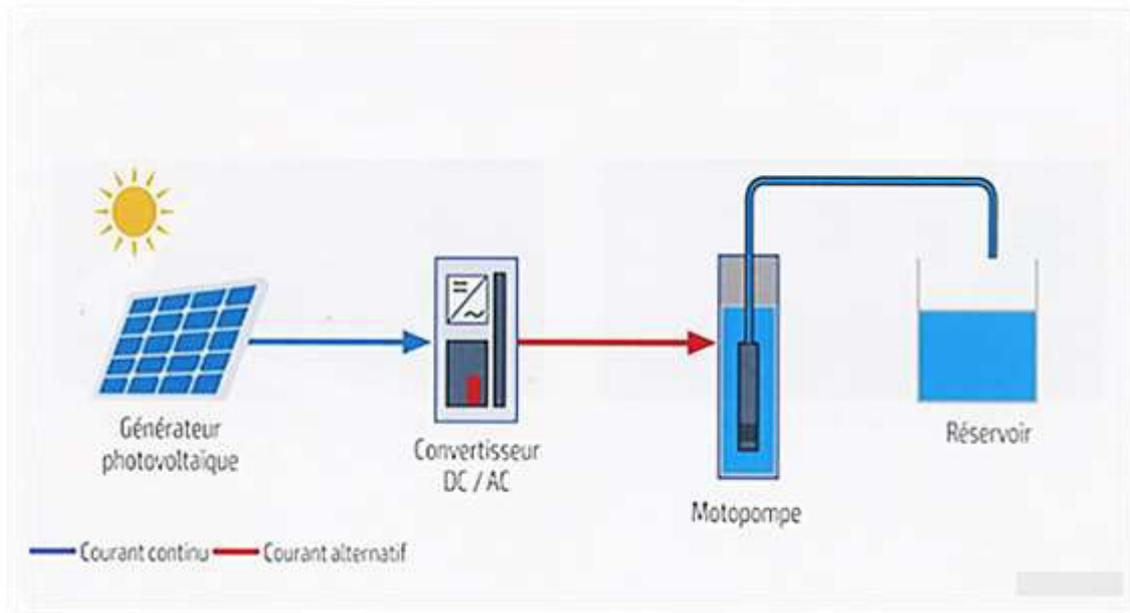


Figure (I.1) : structure d'un système de pompage photovoltaïque [DJE10].

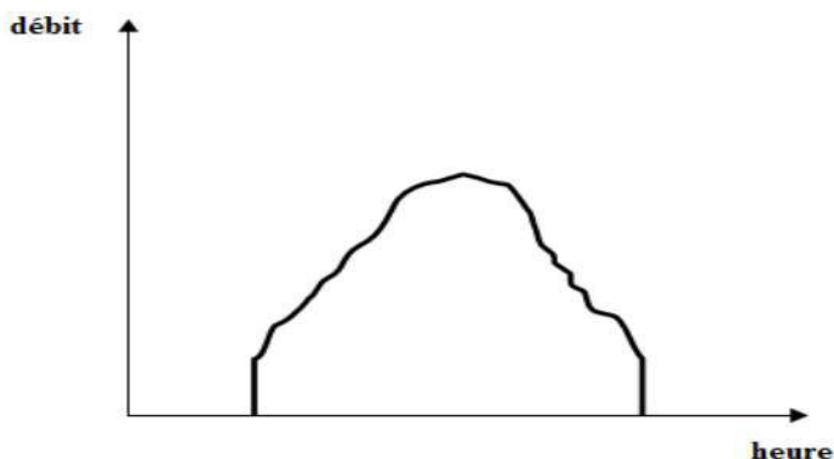
#### I.1.1 Le pompage au fil du soleil :

Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin. Le pompage au fil du soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable, moins coûteux qu'un système avec batterie [ROY98]. Comme nous montre la figure ci-dessous :



**Figure(I.2) :** Principe de fonctionnement du pompage au fil du soleil [ROY98].

Le principe de fonctionnement d'une telle installation reste relativement simplifié avec des panneaux photovoltaïques alimentant une pompe (de surface ou immergée) assistée par un régulateur contrôleur (pouvant être intégré à la pompe selon le fabricant) qui approvisionnent l'eau lorsque les panneaux sont exposés au soleil. Le pompage au fil du soleil utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation. Cette solution est moins coûteuse, mais ces pompes n'ont pas un débit constant et ne fonctionnent pas en dessous d'un certain niveau d'éclairement (début et fin de journée) figure (I.3), leurs rendements étant plus faibles en dehors de la puissance nominale de fonctionnement, il est nécessaire d'installer un adaptateur de charge (convertisseur) [ROY98].



**Figure (I.3):** Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil [BEN14].

### I.1.2 Le pompage avec batterie :

Très souvent, le pompage photovoltaïque ne correspond pas aux heures d'ensoleillement où nécessite une intensité régulière, ce qui implique un stockage. [BEN14]

Le pompage photovoltaïque avec batterie, ce qui va être l'objet de notre travail, permet d'assurer une autonomie énergétique, et un débit constant selon la demande, comme nous montre la figure ci-dessous :

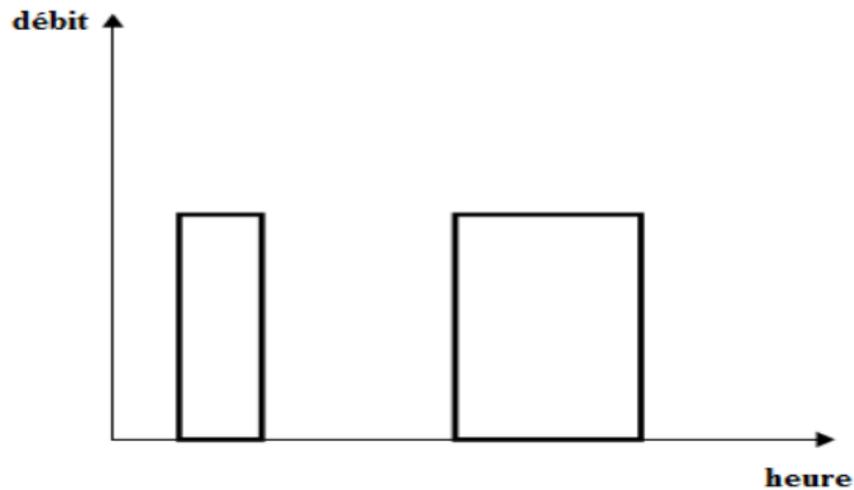


Figure (I.4): Caractéristiques du débit pour le pompage PV avec batterie [BEN14].

Les batteries permettent de stocker l'électricité afin de la restituer en temps voulu. Un régulateur est alors indispensable pour protéger les batteries contre les surcharges ou les décharges profondes nocives pour sa durée de vie.

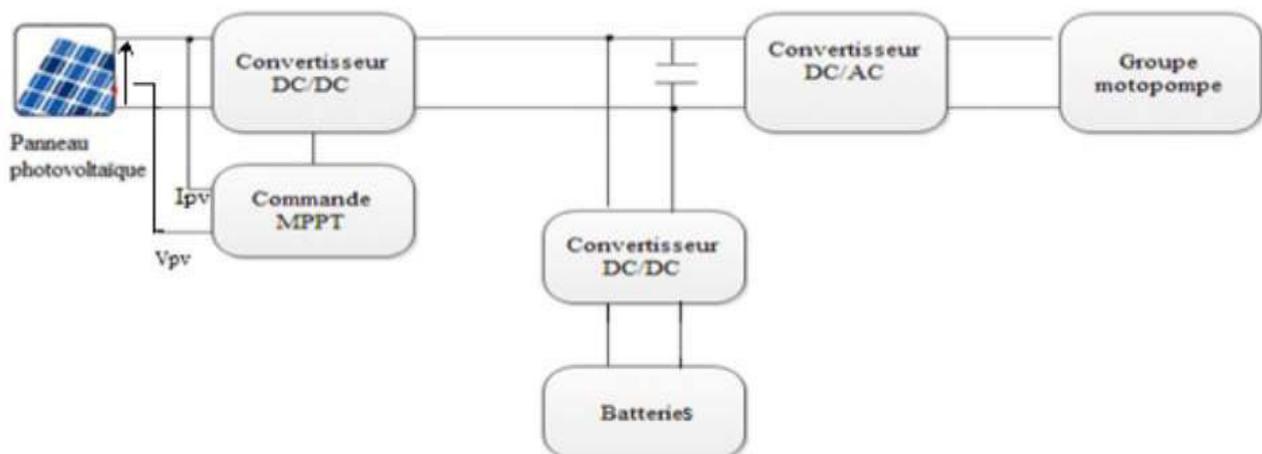


Figure (I.5): principaux composants du système de pompage Photovoltaïque avec batteries [BEN14].

## **I.2 Configuration typique d'un système de pompage photovoltaïque [AOU14] :**

Les éléments d'un système de pompage photovoltaïque doivent être conçus pour fonctionner comme un seul ensemble pour la maximisation des performances globales du système. Différentes solutions peuvent être adoptées pour pomper un certain volume d'eau à une certaine hauteur en fonction des plages de puissance nécessaire dans une application spécifique. Bien que les pompes soient installées en surface ou bien flottante, la configuration la plus commune est une pompe immergée installée dans un trou de forage. La configuration d'un système de pompage PV est déterminée par la définition du type de générateur photovoltaïque, le type de pompe et du type de moteur; ainsi que le type de conditionnement de puissance. On peut distinguer les types de systèmes de pompage photovoltaïques suivants:

### **I.2.1 Systèmes de petite puissance (50-400W) :**

Dans ce type de systèmes, il est utilisé principalement un moteur à courant continu entraînant une pompe centrifuge ou à déplacement positif. Entre le générateur PV et le moteur/pompe on intercale un convertisseur DC/DC pour améliorer son adaptation. Les applications de cette configuration est généralement destinée au pompage des volumes d'eau pouvant atteindre jusqu'à 150 m<sup>3</sup>/Jour.

Les principaux constituants de ces systèmes sont:

- Le Générateur photovoltaïque.
- Le convertisseur DC/DC (facultatif).
- Moteur à courant continu.
- Pompe.
- Entrepôt de stockage (facultatif).

La figure (I.6) montre un schéma synoptique de ce type de configuration, le système de pompage PV à moteur courant continu constitué d'un DC moteur et une pompe. Les types de moteurs à courant continu sont classés selon le champ d'excitation: excitation séparée (aimant permanent), des séries et des moteurs de dérivation. Les modules photovoltaïques produisent du courant continu, donc l'utilisation DC moteurs élimine le besoin de convertisseurs de puissance.

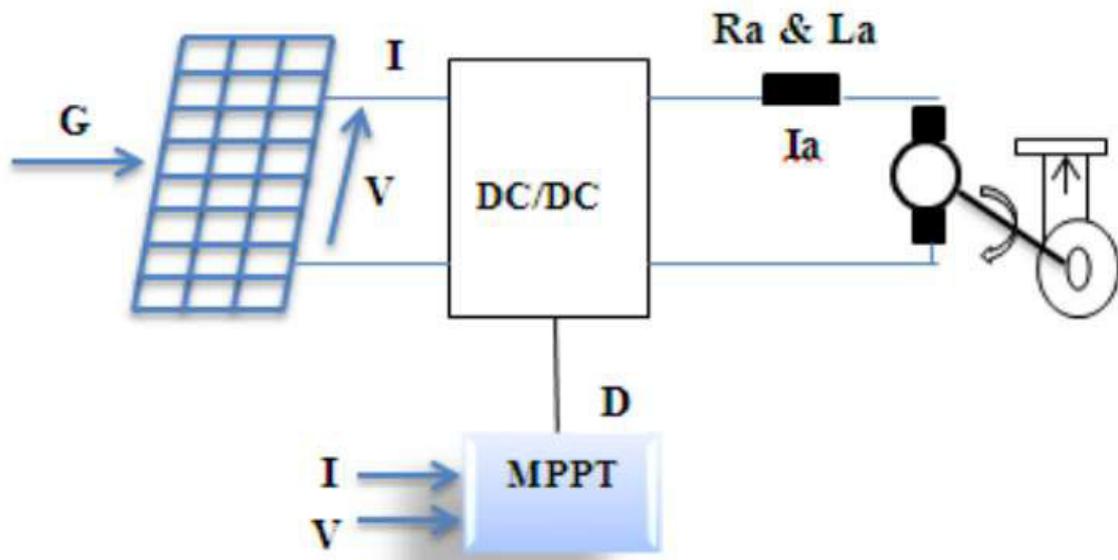


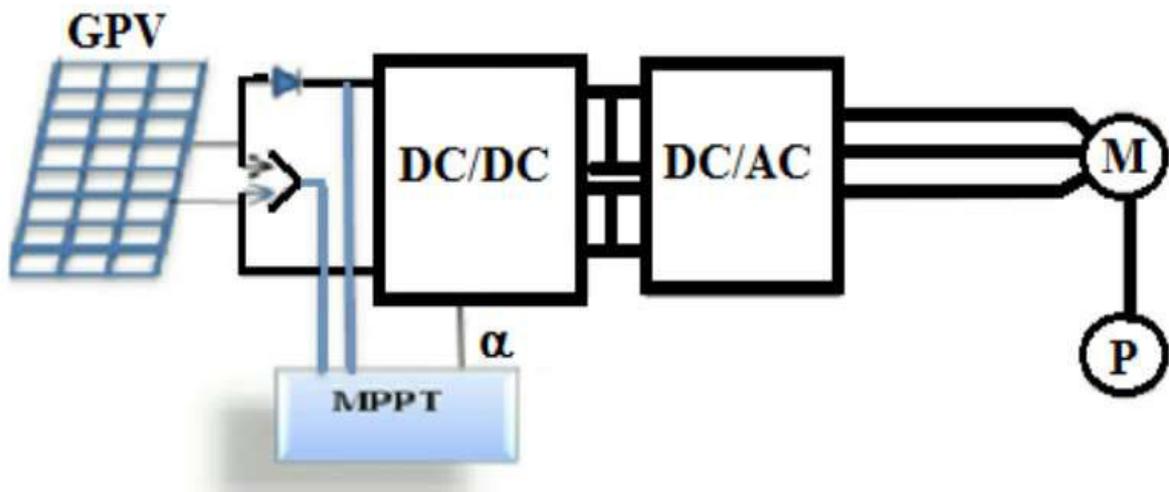
Figure (I.6) : Systèmes de petite puissance [AOU14].

### I.2.2 Les systèmes de moyenne puissance (400-1500 W) :

Composés essentiellement d'une pompe immergée centrifuge entraînée par un moteur à induction à courant alternatif via un convertisseur DC/AC triphasé travaillant à fréquence variable. Un convertisseur DC/DC est généralement intercalé entre le générateur PV et le convertisseur DC/AC pour l'adaptation d'impédance et la recherche du point de puissance maximale (MPPT). Ces types de systèmes sont caractérisés par leur haute fiabilité ainsi que de leur large utilisation depuis les premières installations de pompage photovoltaïque. Les volumes d'eau pouvant être pompés varient entre 150 jusqu'à 1500 m<sup>3</sup>/Jour.

Les éléments clés de ces types de systèmes sont :

- Générateur photovoltaïque.
- Le convertisseur DC/DC (MPPT).
- Le convertisseur DC/ AC.
- Moteur AC.
- Pompe immergée.
- Entrepôt de stockage (facultatif).



Figure(I.7) : schéma qui représente les différents composants d'un système photovoltaïque [AOU14].

### I.3 Description des différents composants d'un système de pompage PV :

Pour d'écrire les différents éléments d'un système de pompage PV on a opté pour un système de moyenne puissance pour leur haute fiabilité ainsi que pour leur large utilisation depuis les premières installations de pompage photovoltaïque, qui est représenté dans la figure (I.7) ci-dessus.

#### I.3.1 Généralité sur l'énergie photovoltaïque :

##### I.3.1.1 Histoire du photovoltaïque [BES18] :

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- **1839** : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- **1875** : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- **1954** : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- **1958** : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

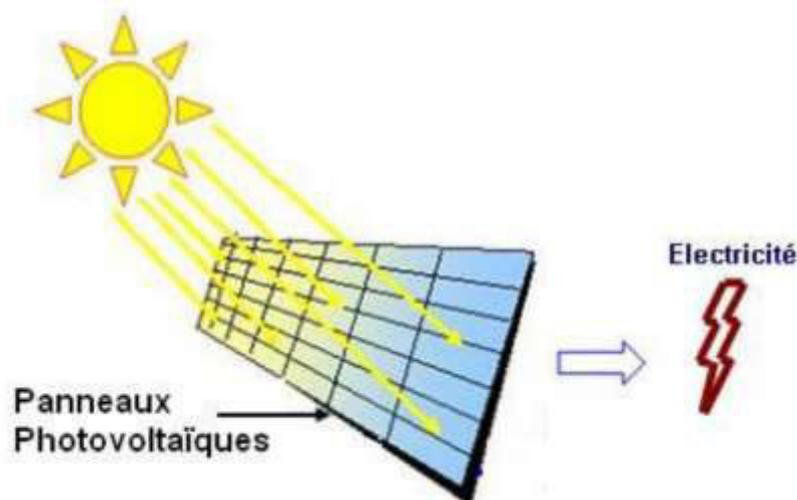
- **1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- **1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

La première *cellule photovoltaïque* (ou *photopile*) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photo-sensibilisée du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé.

Depuis 2012, le solaire photovoltaïque devient compétitif région après région. Si dans un premier temps, seules les régions bénéficiant d'un fort ensoleillement et d'un prix de l'électricité élevé, comme la Californie ou l'Italie, étaient concernées, ce sont aujourd'hui toutes les régions du monde qui connaissent un développement du photovoltaïque pour produire une électricité propre, moins chère, au plus près du lieu de consommation et par le consommateur lui-même.

### I.3.1.2 La conversion de la lumière en électricité:

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le signe « PV », a été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité [BEL12].



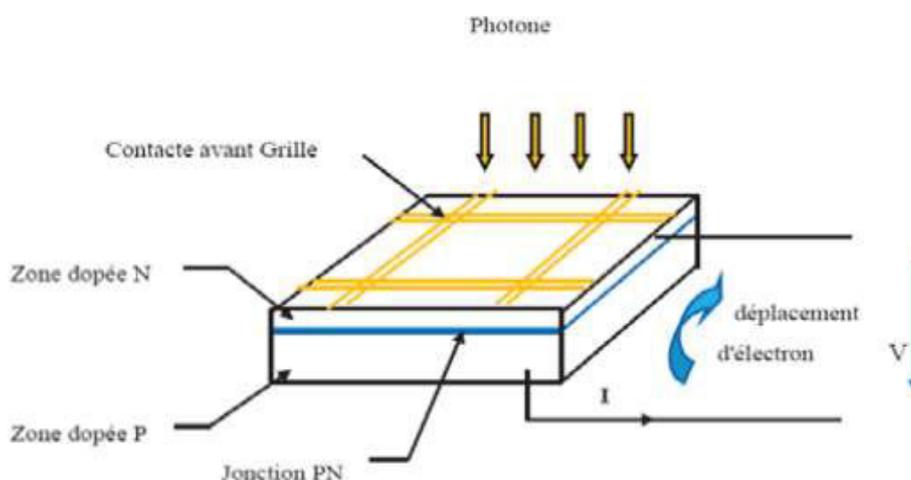
**Figure (I.8)** : conversion de l'énergie solaire en électricité [BEL12].

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable [BEL12].

- Dans un **isolant électrique** : les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer.
- Dans un **conducteur électrique** (un fil de cuivre par exemple) les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant.
- Dans un **semi-conducteur** : la situation est intermédiaire, les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ces photons apportent une énergie permettant aux électrons de se déplacer, il Ya donc courant électrique sous l'exposition à la lumière [BEL12].

### I.3.1.3 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque:

La cellule solaire ou photopile est un semi-conducteur sensible à la lumière, pour, l'obtenir il faut réaliser une structure de diode, c'est-à-dire réaliser une jonction du type p-n, Dans un matériau de silicium. Lorsque les photons ayant suffisamment d'énergie sont absorbés par ce semi-conducteur, ils produisent la rupture d'une liaison de valence (liaison entre les électrons et l'atome) pour chacun des atomes de silicium et un électron se libère .C'est ce qu'on appelle l'effet voltaïque. Grace au champ életron ( $\text{Si}^+$ ) du côté positif on aura une différence de potentiel entre ces deux couches de l'ordre de 0.5V. En reliant ces couches en électricité continu de l'ordre 30mA pour chaque  $1\text{cm}^2$  de capteur sous un ensoleillement maximum de  $1\text{kw}/\text{m}^2$ . Voir figure (I.9) :



**Figure (I.9) :** Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque [BOU10].

Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement [BEL08], voir figures ci-dessous :

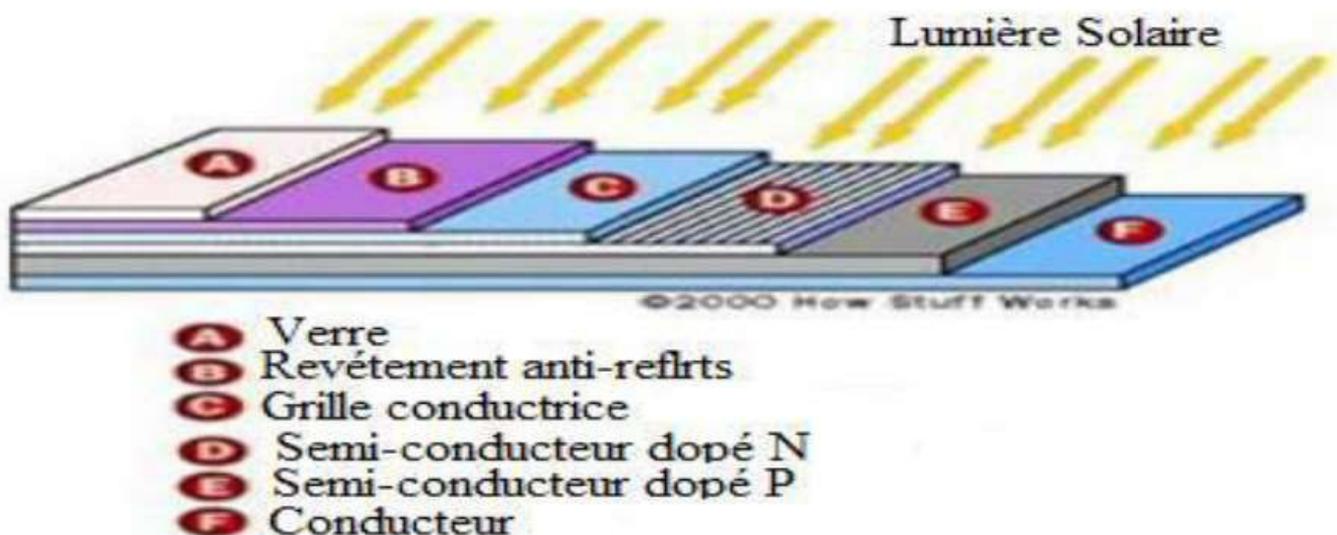


Figure (I.10) : Structure basique d'une cellule solaire [HAN14].

#### I.3.1.4 Caractéristique du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est une diode à jonction PN particulière. Dans l'obscurité, elle se comporte comme une photodiode dont le fonctionnement nécessite une alimentation, et sa caractéristique est identique à celle d'une diode. Une fois exposée à la lumière elle joue le rôle d'un générateur de courant continu (DC) [LAB07]. De façon générale, le quadrant où se trouve la zone de puissance utile est utilisé de façon inversée pour y faciliter la lecture du comportement des générateurs photovoltaïques en fonctionnement normal (Figure I.11) [SOC10].

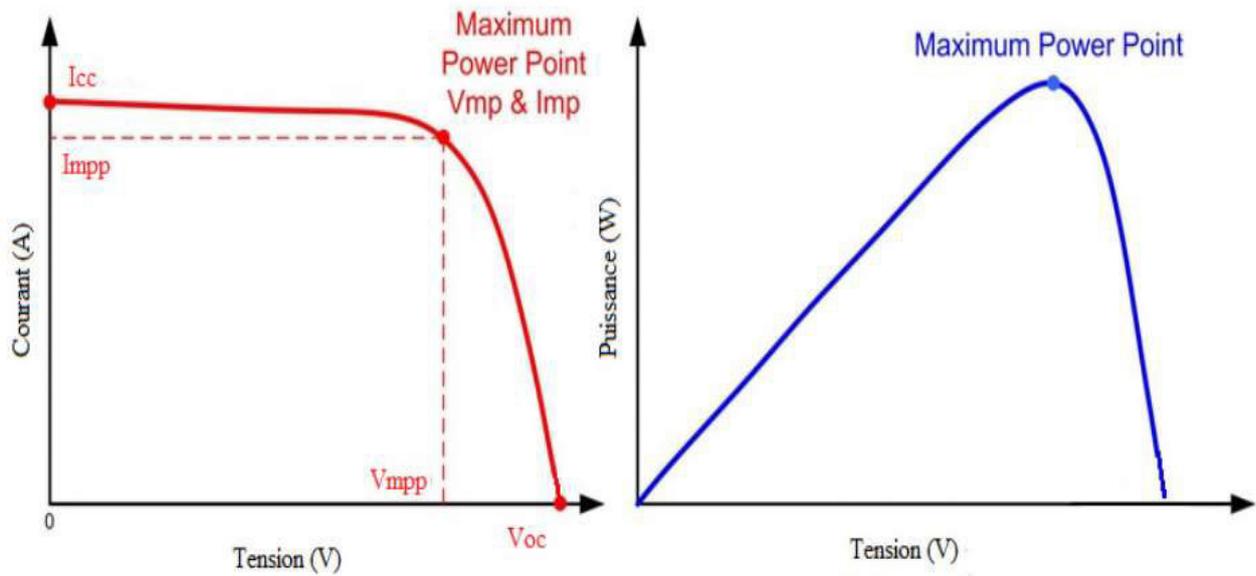


Figure (I.11) : Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule Photovoltaïque [BRN14].

### I.3.1.5 Technologie des cellules photovoltaïque :

On distingue trois générations des cellules photovoltaïques en fonction des développements technologiques [WER09], [MAK13].

#### a. Technologies de la 1ère génération à base de Silicium Cristallin :

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N qui utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les wafers de silicium est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté. On différencie également les cellules à base de silicium monocristallin et poly cristallin [WER09].

#### b. Technologies de la 2ème génération à base de couche-mince :

Plus récemment sont apparues les technologies de couches minces, plus fines et dont la part du marché semble promise à une augmentation rapide. Les cellules dites couche mince (Thin-film) constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses.

On distingue plusieurs types de cellules couche minces à savoir :

- ❖ Le silicium amorphe (a-si).
- ❖ Le tellure de Cadmium (CdTe).
- ❖ Le cuivre/indium/sélénium ou cuivre/indium/Gallium/sélénium (CIS ou CIGS) [MAK13].

**c. Technologies de la 3ème génération «les cellules organiques » :**

Elles sont constituées de molécules organiques combinant flexibilité et légèreté. Il y a trois types de ces cellules: les moléculaires, celles en polymères et les organiques hybrides. Ces technologies sont encore au stade de la recherche et de développement [WER09].

**I.3.1.6 Avantages et inconvénients du photovoltaïque :****• Avantage [LAL09] :**

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

**• Inconvénients [ANK12] :**

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

**I.3.1.7 Le module photovoltaïque [KEH12]:**

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polyéthylène EVA (éthylène-vinyle-acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière de polyéthylène.

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation. A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles. Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre.

### I.3.1.8 Générateur photovoltaïque [KEH12] :

Qui représente l'outil de conversion de l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique en courant continu. Il est composé d'un ensemble de panneaux. Le panneau est constitué de plusieurs modules (structurés en série ou en parallèle ou hybride). le module contient des rangés de cellules (structurées en série ou en parallèle ou hybride) et généralement des cellules à base de silicium.

### I.3.1.9 Protection des modules photovoltaïques :

Lors de la conception d'une installation photovoltaïque, il faut assurer sa protection électrique afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leurs fonctionnement. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations photovoltaïques [BEL12] :

- **La diode anti-retour** : empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit [BEL12].
- **la diode by-pass [LAB07]** : La diode by-pass elle a comme rôle de sécuriser les cellules photovoltaïque contre les surcharges des courants intervenant de facteurs extérieurs comme par exemple le foudroiement provenant de la foudre, donc elle permet de circuler les courants électriques de surcharges pour éviter la détérioration de la cellule.

### I.3.1.10 Les différents systèmes photovoltaïques [ANK12]:

Les systèmes photovoltaïques peuvent être divisés en trois catégories : autonome, systèmes hybrides et raccordé au réseau. Pour les endroits qui sont loin du système de production d'électricité conventionnel, des systèmes autonomes d'alimentation en énergie photovoltaïque ont été considérés comme une meilleure alternative.

### I.3.2 Les convertisseurs statiques DC/DC (hacheur) [DAO13]:

L'impédance d'entrée d'un convertisseur statique du type DC/DC doit être adaptée afin de forcer le générateur photovoltaïque à travailler au point de puissance maximale. Ce convertisseur peut fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. En fonction des caractéristiques de la charge, la tension de sortie ( $V_s$ ) peut être supérieure ou inférieure à la tension d'alimentation ( $V_o$ ).

Les convertisseurs statiques du type DC/DC se divise généralement en deux catégories : abaisseur de tension (Hacheur dévolteur), élévateur de tension (Hacheur survolteur).

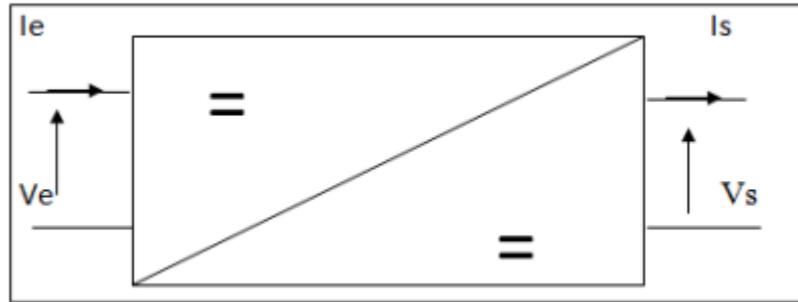


Figure (I.12) : Convertisseur DC-DC [BES18].

### I.3.2.1 Hacheur dévolteur [DAO13]:

La figure (I.13) représente le circuit de base d'un hacheur dévolteur. Le commutateur connecte et déconnecte l'entrée du circuit et ainsi une tension de forme rectangulaire va apparaître au niveau de la diode. Cette tension est filtrée par un filtre passe bas (LC) en fournissant une tension quasi continue en sortie du circuit. Ce type de convertisseur est généralement utilisé dans les applications photovoltaïques comme une alimentation DC ou  $V_s$  varie en fonction de l'ensoleillement et la température alors que  $V_o$  reste presque constante. La valeur moyenne de la tension de sortie est ajustée en contrôlant les états ON et OFF ( $t_{on}$  et  $t_{off}$ ) du commutateur.

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

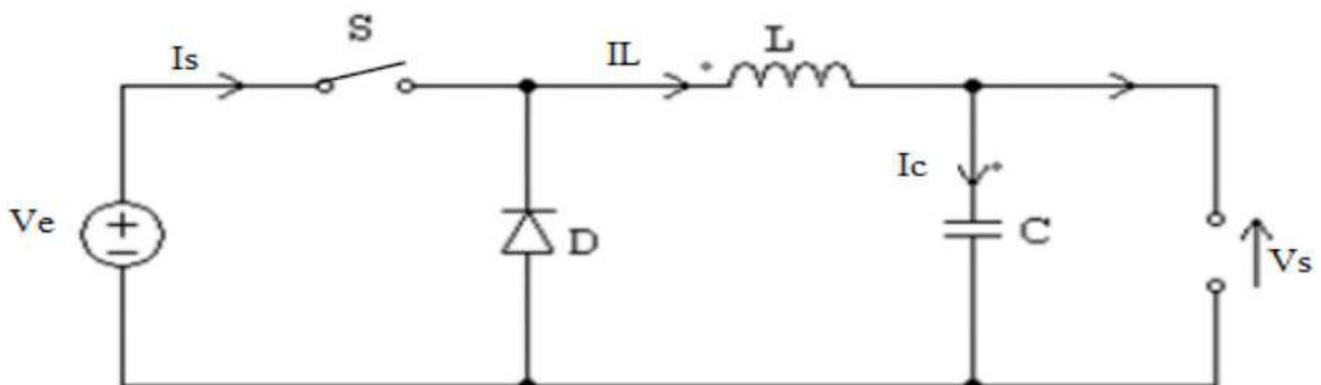


Figure (I.13) : Hacheur dévolteur [BEN14].

### I.3.2.2 Hacheur survolteur :

Le hacheur élévateur ou survolteur est généralement utilisé dans les applications photovoltaïques spécialement pour la charge des batteries. Le schéma de la figure (I.14) représente le circuit de base d'un élévateur ayant les mêmes composants que l'abaisseur de tension avec une disposition différente. Les états de commutations sont contrôlés avec une période constante et un rapport cyclique variable.

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

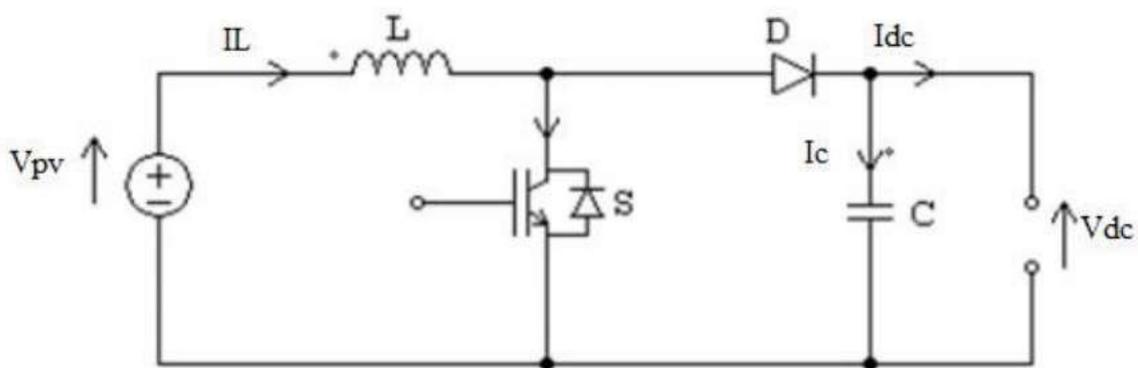


Figure (I.14) : Hacheur survolteur [BEN14].

### I.3.3 Convertisseur DC/AC (Onduleur) [BEN14] :

La fonction de l'onduleur est de transformer le courant continu produit par le générateur photovoltaïque, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Les onduleurs sont des structures en pont constituées le plus souvent d'interrupteurs électroniques comme des IGBT (transistors de puissance).

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

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

- ❖ Une deuxième fonction de l'onduleur est d'adapter le point de fonctionnement (Courant tension) au générateur.
- ❖ Une troisième fonction de l'onduleur est la gestion et la protection de l'installation

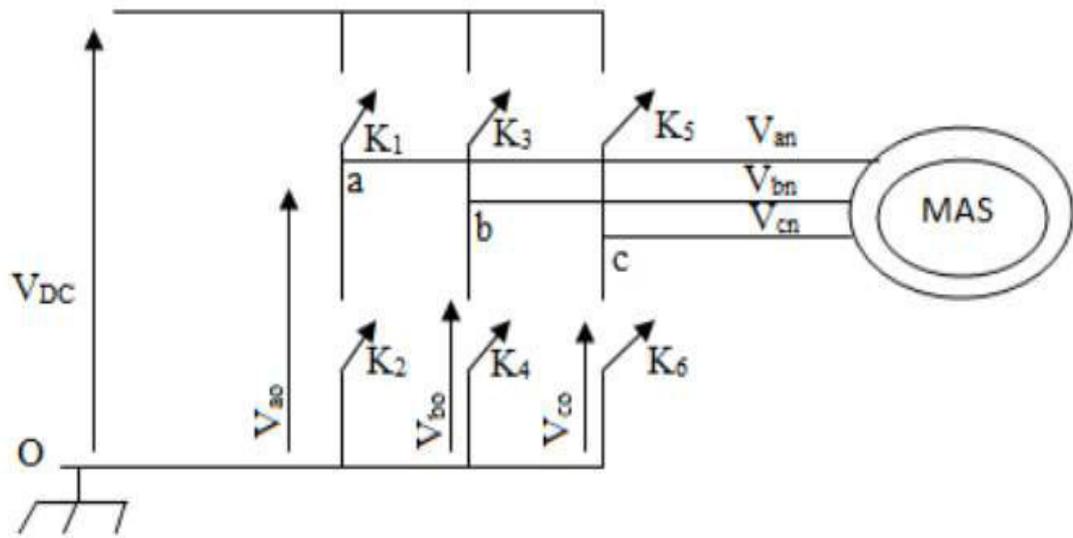


Figure (I.15) : Circuit de l'onduleur relié à la machine [BEN14].

### I.3.3.1 La commande de l'onduleur [BES18]:

#### I.3.3.1.1 Généralité :

Les onduleurs de tension peuvent être pilotés suivant plusieurs stratégies. Le choix d'une stratégie de commande dépend du type de charge à commander, de la gamme de puissance, des semi-conducteurs utilisés pour l'onduleur et de la simplicité d'implantation de l'algorithme.

A faibles fréquences, ils sont pilotés à pleine onde, le signal de commande sera à la fréquence de la tension désirée à la sortie, et la source continue doit être réglable (à l'aide d'un redresseur à thyristor ou d'un hacheur).

A fréquence élevée, ils sont pilotés en modulation de largeur d'impulsion. Cette dernière stratégie permet de régler à la fois l'amplitude et la fréquence en gardant la source continue constante (pont à diode).

Afin de produire une tension de sortie proche de la sinusoïde, on trouve différentes stratégies de commande de l'onduleur, en pleine onde ( $180^\circ$ ), MLI sinusoïdale, vectorielle et par hystérésis.

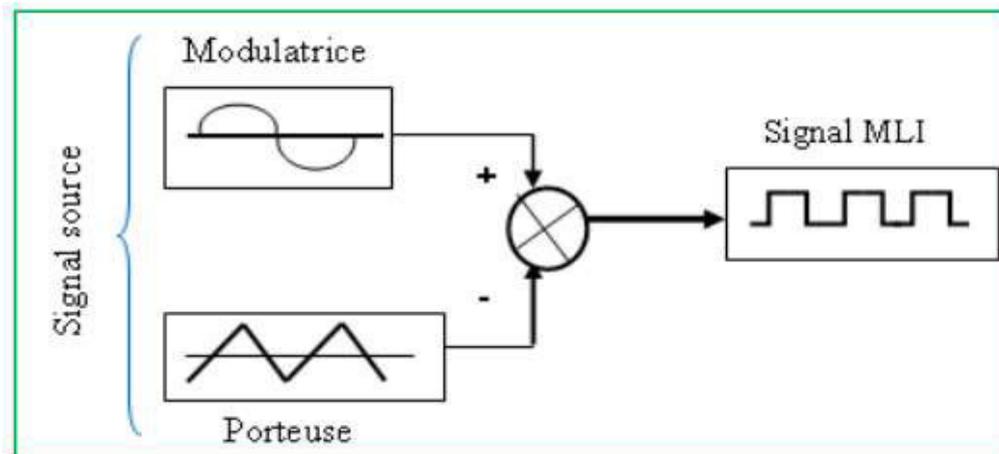
- En pleine onde (180°) les tensions obtenues sont très riches en harmonique ce qui provoque l'échauffement des charges.
- La MLI sinusoïdale demande de déterminer les instants de commutations des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur séparément.
- La commande par hystérésis est très simple et très rapides mais sa fréquence instantanée des commutations n'est pas contrôlable. [**Commande onduleur**]

### I.3.3.1.2 Contrôle du courant par M.L.I :

La méthode de contrôle des courants par modulation de largeur d'impulsion (M.L.I) à partir d'une source de tension continue, consiste à imposer aux bornes de la machine des créneaux de tension de manière que le fondamental de la tension soit le plus proche de la référence de la tension sinusoïdale. [MLI]

La M.L.I. est obtenue par la comparaison de deux signaux :

Un signal triangulaire de haute fréquence ( $F_p$ ) appelé "porteuse" et un signal de référence appelé "modulatrice", de fréquence  $F_m \ll F_p$ . Les intersections de ces deux signaux déterminent les instants de commutation des interrupteurs de l'onduleur. Figure (I.16)



**Figure (I.16):** schéma synoptique d'un M.L.I [BES18].

Ces deux signaux sont définis comme étant :

**L'onde porteuse** : qui est signal à haute fréquence (en général, une onde triangulaire).

**L'onde modulatrice** : qui est un signal image de l'onde de sortie recherchée. (En général une onde sinusoïdale). Deux principaux paramètres qui caractérisent la MLI :

**L'indice de modulation  $M_L$**  : appelé aussi (taux d'harmonique) qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulatrice à celle de l'onde porteuse :

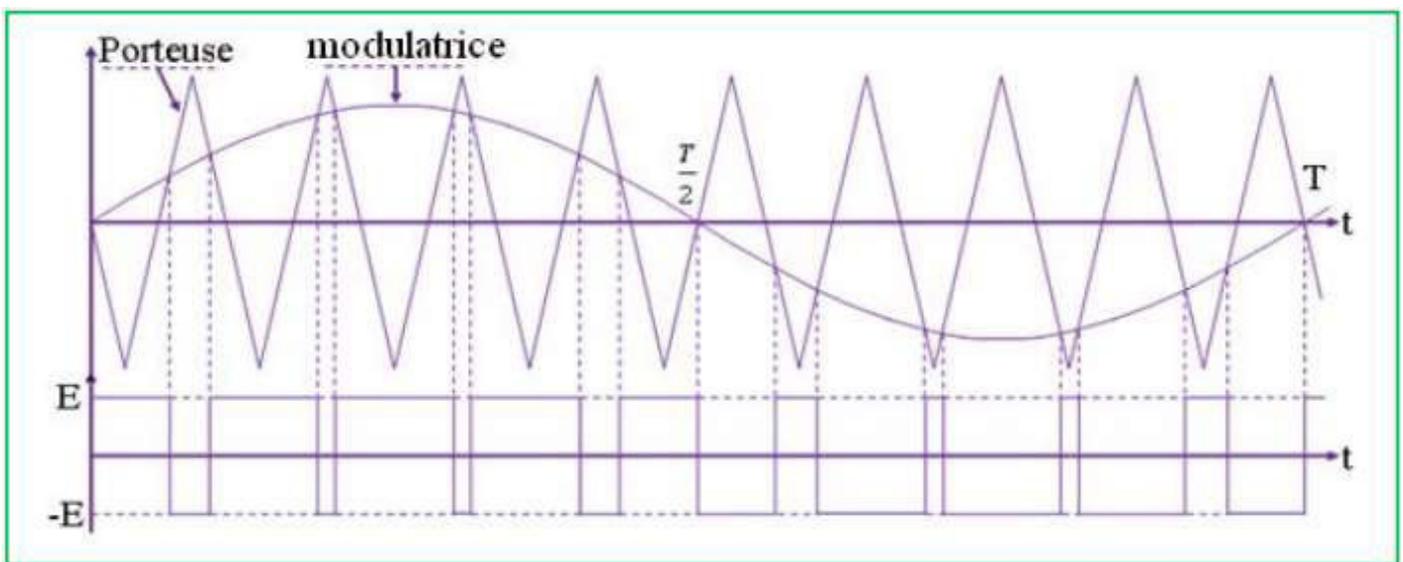
$$M_L = \frac{V_m}{V_p} < 1 \quad (\text{I.1})$$

**Le rapport de modulation  $M_r$ :** qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulatrice :

$$M_r = \frac{F_p}{F_m} \quad (I.2)$$

### I.3.3.1.3 MLI à échantillonnage naturel :

L'échantillonnage naturel, est un processus de sélection naturelle des points échantillonnés, c'est la technique la plus utilisée et la plus simple, consiste à comparer le signal triangulaire (porteuse) avec un signal sinusoïdal (Modulateur). L'intersection de ces deux signaux définit les instants de commutation des interrupteurs.



**Figure (I.17) :** M.L.I à échantillonnage naturel [BES18].

### I.3.4 Commande MPPT [BEN14] :

La conception globale d'un système photovoltaïque optimisé est par nature difficile. du côté de la source, pour un générateur photovoltaïque, la production de la puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, et aussi la variation de comportement de la charge en fonction de la consommation, ce qui est souvent difficile à prévoir. En effet, sous ces conditions changeantes la puissance extractible est variable. Il est possible : c'est ainsi qu'y naît en quelque sorte l'idée de MPPT (Maximum Power Point Tracking). La méthode de suivi de PPM (Point de puissance maximal) est basée sur l'utilisation d'un algorithme de recherche où le maximum de la courbe de puissance est estimé sans interrompre le fonctionnement normal du panneau photovoltaïque, contrairement au contrôle à tension fixe. Le maximum de puissance est atteint par contrôle actif de la puissance, en forçant la dérivée de la puissance par rapport au temps à être nulle.

Le MPPT n'est pas basé sur une valeur de référence prédéterminée mais il s'agit d'une recherche de la valeur de référence pour atteindre le maximum de la puissance sur la caractéristique courant/tension. A noter que le MPPT joue un rôle très important parce qu'il maximise le rendement et il réduit le coût. Le MPPT peut extraire plus de 97% de puissance photovoltaïque une fois correctement optimisé.

Parmi les solutions MPPT actuellement disponibles, on retrouve quelques méthodes (classiques et modernes) du suivi du point de fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque et qui sont :

- Méthode de perturbation et observation (PO).
- Méthode de conductance Incrémentale (IC).
- Méthode de logique floue (FL).
- Méthode de la logique floue optimisée par le PSO (PSO-FL).

### **I.3.5 Groupe moteur-pompe :**

Un groupe motopompe est un ensemble composé d'un moteur électrique entraînant une pompe hydraulique.

#### **I.3.5.1 Moteurs :**

Le moteur d'un groupe motopompe convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif.

Dans ce dernier cas, un convertisseur électronique ou un onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant d'un générateur photovoltaïque en courant alternatif. Pour cette raison, le choix d'un moteur à courant continu peut sembler, de prime abord, plus intéressant, mais nous allons voir que l'évolution des convertisseurs électroniques efficaces permet également de choisir des moteurs alternatifs efficaces et surtout, moins cher. [BEL12]

##### **a) Moteur à courant continu [BEL12] :**

Ces moteurs sont alimentés par des tensions continues. L'avantage principal des machines à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation. Son principal défaut réside dans l'ensemble balais/ collecteur rotatif qui s'use, il est complexe à réaliser et consomme de l'énergie.

**b) Moteur à courant alternatifs [SIT2] :**

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

**b.1). Les moteurs synchrones :**

La machine synchrone est souvent utilisée comme génératrice. On l'appelle alors « Alternateur ». Mis à part pour la réalisation de groupe électrogène de faible puissance, cette machine est généralement triphasée. Pour la production d'électricité, les centrales électriques utilisent des alternateurs dont les puissances peuvent avoisiner les 1500 MW. Comme le nom l'indique, la vitesse de rotation de ces machines est toujours proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent [SIT2].

**b.2). Les 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 [SIT2]. L'utilisation d'un moteur asynchrone (à courant alternatif triphasé), plus robuste moins cher et sans entretien, devient une solution plus économique et plus pratique même au prix d'un circuit électronique de commande plus complexe pour les systèmes de pompage photovoltaïques. L'utilisation d'un moteur asynchrone augmente ainsi l'autonomie et la fiabilité de l'installation. Le moteur est alimenté par un onduleur (convertisseur DC/AC) qui assure l'optimisation du générateur [BOU12].

Dans ce travail, on utilise la machine asynchrone, parce qu'elle est la machine la plus fiable des machines électriques, la plus robuste de sa génération et la moins coûteuse à la fabrication.

### **I.3.5.2 Pompes :**

Les pompes à eau sont habituellement classées selon :

- Leur principe de fonctionnement : soit de type centrifuge ou volumétrique.
- 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 mètre (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres. Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-ci. Ces pompes doivent également être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau [BEL12].

Les pompes à refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface ; la transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur [BEL12].

#### **I.3.5.2.1 Les pompes centrifuges [BEL12] :**

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

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

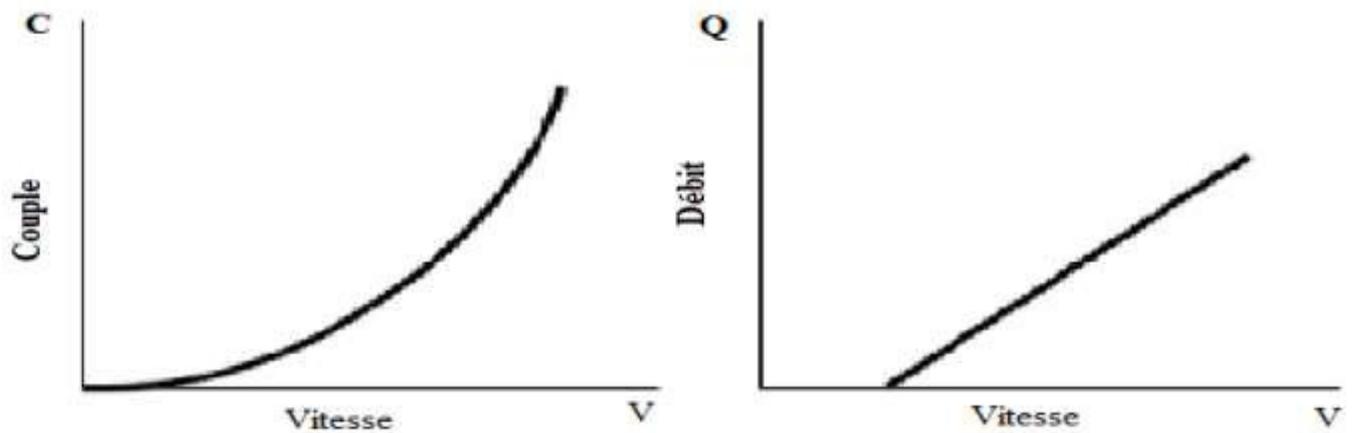


Figure (I.18) : Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge [BEL12].

### I.3.5.2.2 Les pompes volumétriques [MOU01] :

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

- Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à 5 m<sup>3</sup>/h) et aux grandes hauteurs
- Elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont à auto-amorçages.

Le couple de démarrage d'une pompe volumétrique (de 3 à 5 fois le couple nominal) et la caractéristique  $I=f(V)$  de ce type de pompe font que son fonctionnement en direct sur un panneau photovoltaïque n'est pas économiquement viable. Pour pallier au problème de surdimensionnement du générateur résultant de cette inadaptation, un adaptateur d'impédance est utilisé pour permettre un rendement aussi élevé que possible de l'ensemble du système.

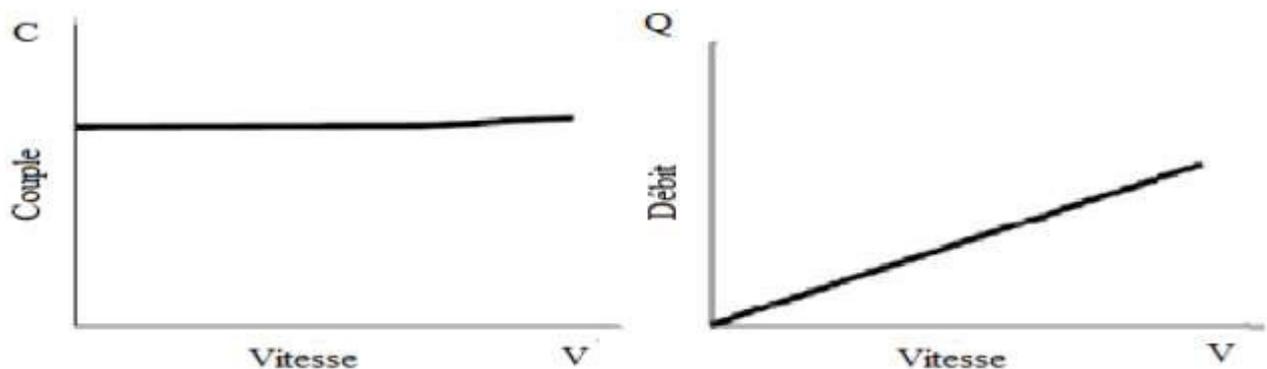


Figure (I.19) : Caractéristiques d'une pompe volumétrique [BEL12]

I.3.5.2.3 Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique [SIT3] :

	Pompes centrifuges	Pompes volumétriques
<b>Mécanique</b>	Met le liquide en mouvement, ce qui crée une pression à la sortie (une pression apparaît, entraînant un débit).	Isole une certaine quantité de liquide et la transfère de l'orifice d'aspiration à celui de refoulement (un débit est créé, entraînant une pression).
<b>Performance</b>	Le débit dépend de la pression variable.	Le débit est constant quelle que soit la pression.
<b>Viscosité</b>	Le rendement diminue avec l'augmentation de la viscosité du fait des pertes par frottement dans la pompe.	Le rendement augmente avec la viscosité.
<b>Rendement</b>	Rendement optimal en un point. À des pressions différentes, le rendement diminue.	Le rendement augmente avec la pression.
<b>Conditions d'entrée</b>	Le liquide doit être dans la pompe pour créer un différentiel de pression. Auto-amorçage d'une pompe à sec impossible.	Une pression négative est créée à l'orifice d'entrée. Autoamorçage d'une pompe à sec possible.

Tableau (I.1) : Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique

La pompe centrifuge présente d'innombrables avantages par rapport aux types de pompage, elle a un volume moins encombrant, un service relativement silencieux et une mise en œuvre faible avec tous les types de moteurs électriques disponibles sur le marché. Elle s'adapte aussi aisément à tous les problèmes de traitement des liquides, et elle répond aux exigences spécifiques des installations. Tous ces avantages nous emmènent à choisir comme pompe pour notre système de pompage, la pompe centrifuge.

**I.4 Structure du système de pompage a étudié [DAO13]:**

Le pompage solaire photovoltaïque au fil du soleil représente la solution idéale pour l’approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent. Ce type de système est très simple car il est composé d’un couplage direct entre le générateur photovoltaïque et la pompe et il est destiné pour une durée de pompage tout au long de la journée. Dans ce cas, le stockage d’énergie peut se faire de deux façons: stockage d’énergie électrique ou stockage d’eau. Cette dernière solution est souvent adoptée car il est plus pratique de stocker l’eau dans des réservoirs que l’énergie électrique dans des accumulateurs lourds, coûteux, fragiles, et nécessitant un entretien. Les batteries introduisent également un certain degré de perte de rendement d’environ 20 % à 30 % de la production d’énergie. La simplicité d’un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil se heurte au problème d’adaptation de charge puisque le couplage direct ne permet pas au générateur de délivrer sa puissance maximale durant une journée complète. Il est donc nécessaire de faire fonctionner ces générateurs à leur puissance optimale car l’énergie fournie par le générateur Photovoltaïque est une énergie chère malgré l’abaissement du coût du watt-crête. L’approche du problème consiste à intercaler entre le générateur et le récepteur un convertisseur statique (hacheur ou onduleur) pour effectuer le transfert optimal de puissance. Par conséquent, le système de pompage solaire sera généralement composé d’un générateur photovoltaïque, d’un groupe moteur-pompe, d’un dispositif électronique de commande et de contrôle, et d’une partie de stockage.

De ce fait l’utilisation d’un moteur asynchrone (à courant alternatif triphasé) plus robuste moins cher et sans entretien devient une solution plus économique et plus pratique même au prix d’un circuit électronique de commande plus complexe. L’utilisation d’un moteur asynchrone augmente ainsi l’autonomie et la fiabilité de l’installation. Le moteur est alimenté par un onduleur (convertisseur DC/AC) qui assure l’optimisation du générateur.

Et on a choisit la pompe centrifuge qui présente d’innombrables avantages par rapport aux types de pompage, elle a un volume moins encombrant, un service relativement silencieux et une mise en œuvre faible avec tous les types de moteurs électriques disponibles sur le marché. Elle s’adapte aussi aisément à tous les problèmes de traitement des liquides, et elle répond aux exigences spécifiques des installations. Tous ces avantages nous emmènent à la choisir comme pompe pour notre système de pompage.

**• Conclusion :**

Dans cette recherche bibliographique nous avons présenté des généralités sur le pompage photovoltaïque, elle nous a permis de faire le choix sur chacun des constituants de notre système de pompage photovoltaïque (panneau, moteur, pompe, convertisseur (hacheur/onduleur), et la modélisation des différents constituants feront l'objet du prochain chapitre.



**Chapitre II**  
**Modélisation des éléments du**  
**système de pompage**

## Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons les équations caractérisant le fonctionnement et les modèles mathématiques bien détaillés qui seront utilisés pour modéliser les différentes parties du système de pompage photovoltaïque, afin de prévoir son comportement. En représentant en premier lieu les modèles électriques d'un générateur PV et les équations régissant son fonctionnement, le modèle du hacheur BOOST et de l'onduleur, la modélisation du moteur asynchrone et de la pompe centrifuge.

## II.1 Modélisation du générateur photovoltaïque :

### II.1.1 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque :

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

Il existe de nombreux modèles de générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul du courant et de la tension. Parmi ces modèles on trouve :

#### ➤ Le modèle idéalisé:

C'est le modèle le plus simplifié, la valeur de la résistance  $R_{sh}$  étant généralement très grande, elle est donc souvent supposée infinie (et donc négligée), la valeur de la résistance  $R_s$  étant petite elle est supposée être nulle ( $R_s=0$ ). Cette modèle peut être schématisée par un générateur de courant en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (II.1), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale

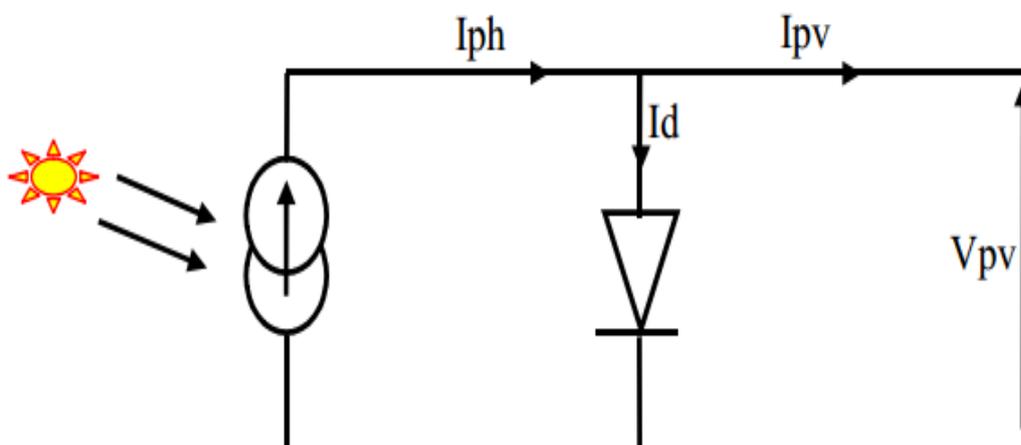


Figure (II-1): Modèle d'une cellule photovoltaïque idéale [BEK04].

- L'équation retenue de ce modèle est :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \tag{II.1}$$

- Le courant  $I_{ph}$  est assimilé au courant  $I_{cc}$  avec  $V_{pv} = 0$ , courant de court-circuit.

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i *(T_c - T_{ref})] * \frac{G}{G_{ref}} \tag{II.2}$$

$K_i$ : Coefficient de température du court-circuit de la cellule (Ampères / K)

$T_c$ : Température de la cellule en Kelvin

$G$  : L'éclairement absorbe par la cellule

$G_{ref}$  : L'éclairement de référence (1000 w/m<sup>2</sup>)

$$I_d = I_0 (e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1) \tag{II.3}$$

$I_0$  : Courant de saturation de la diode

$$V_t = \frac{BKT}{q} \tag{II.4}$$

$V_t$  : Tension thermique

$B$  : Facteur d'idéalité

$K$  : Constant de Boltzmann (1,38\*10<sup>-23</sup> J/K)

$q$  : Charge de l'électron (1,6\*10<sup>-19</sup> C)

➤ **Le modèle réelle (cinq paramètres 5P) :**

Pour tenir compte des chutes de tension dans les zone P et N, on doit ajouter une résistance série dans le modèle idéalisé, une résistance série  $R_s$  et pour le courant de fuite, une résistance parallèle  $R_{sh}$

- la résistance série est la résistance interne de la cellule; elle principalement la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles
- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

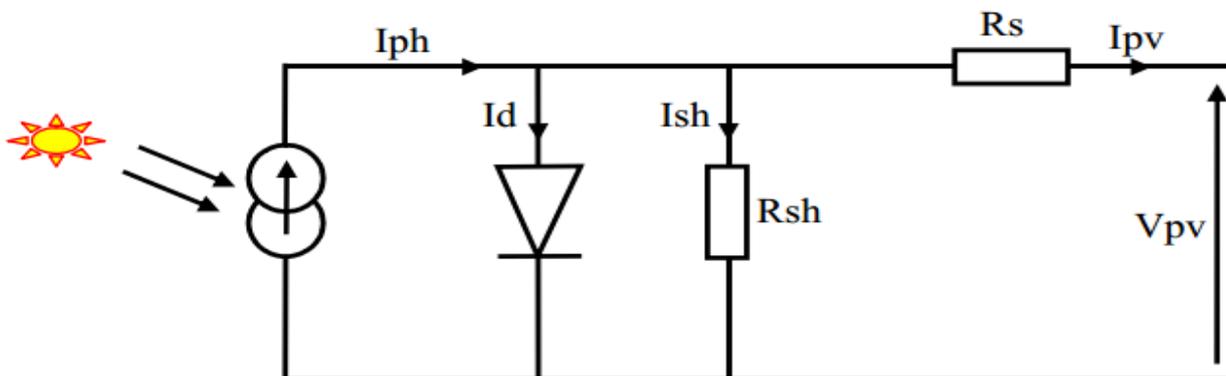


Figure (II-2) : Modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode.

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \quad (II.5)$$

Avec :

$I_{pv}$  : Courant délivré par la photopile.

$I_{ph}$  : Photo courant.

$I_d$  : Courant de la diode.

$I_{Rsh}$  : Courant shunt

### a. Le photo-courant

C'est le courant généré par une cellule, il est proportionnel à l'irradiation solaire et est légèrement influencé par la température selon l'équation suivante :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i (T - T_{ref})] * \frac{G}{G_{ref}} \quad (II.6)$$

Avec :

$I_{cc}$  [A] : Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur).

$K_i$  [A/K] : Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau.

$T$  [K] : Température ambiante.

$G$  [W/m<sup>2</sup>] : Irradiation sur la surface de la cellule.

$T_{ref}$  [K] : Température de référence (298.15 K).

$G_{ref}$  [W/m<sup>2</sup>] : Irradiation de référence (1000 W/m<sup>2</sup>).

### b. Le courant de saturation $I_0$

Ce courant varie avec la température et est donné par :

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \exp \left[ \frac{qEg}{Ak} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right) \right] \quad (II.7)$$

Avec :

$Eg$  [eV] : Énergie de gap du semi-conducteur (1.1 eV pour le silicium poly cristallin à 25°C).

### c. Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite)

Son expression est donnée par l'équation :

$$I_{rs} = \frac{I_{cc}}{\exp\left(\frac{qV_{co}}{kAT}\right) - 1} \quad (II.8)$$

Où :

$V_{co}$  [V] : Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur).

$A$  : Constante d'idéalité de la jonction ( $1 < A < 2$ ).

À partir des expressions décrites précédemment on peut déduire le courant délivré par une cellule

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{AKT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (II.9)$$

**d. Le courant du panneau**

Les équations décrites précédemment ne peuvent représenter la caractéristique I-V d'un module PV puisqu'elles sont propres à une seule cellule PV qui représente l'élément de base du panneau, on introduit donc l'équation spécifique à un module :

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{NsAKT} \right) - 1 \right] - N_p \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (II.10)$$

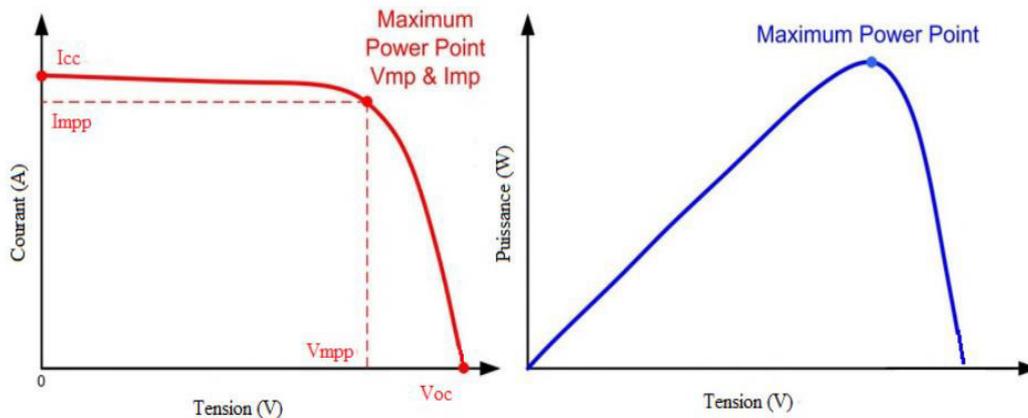
Où :

**Ns** : Nombre de cellules connectées en série dans un module.

**Np** : Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module.

**II.1.2 Caractéristique courant-tension d'un module [HAN14] :**

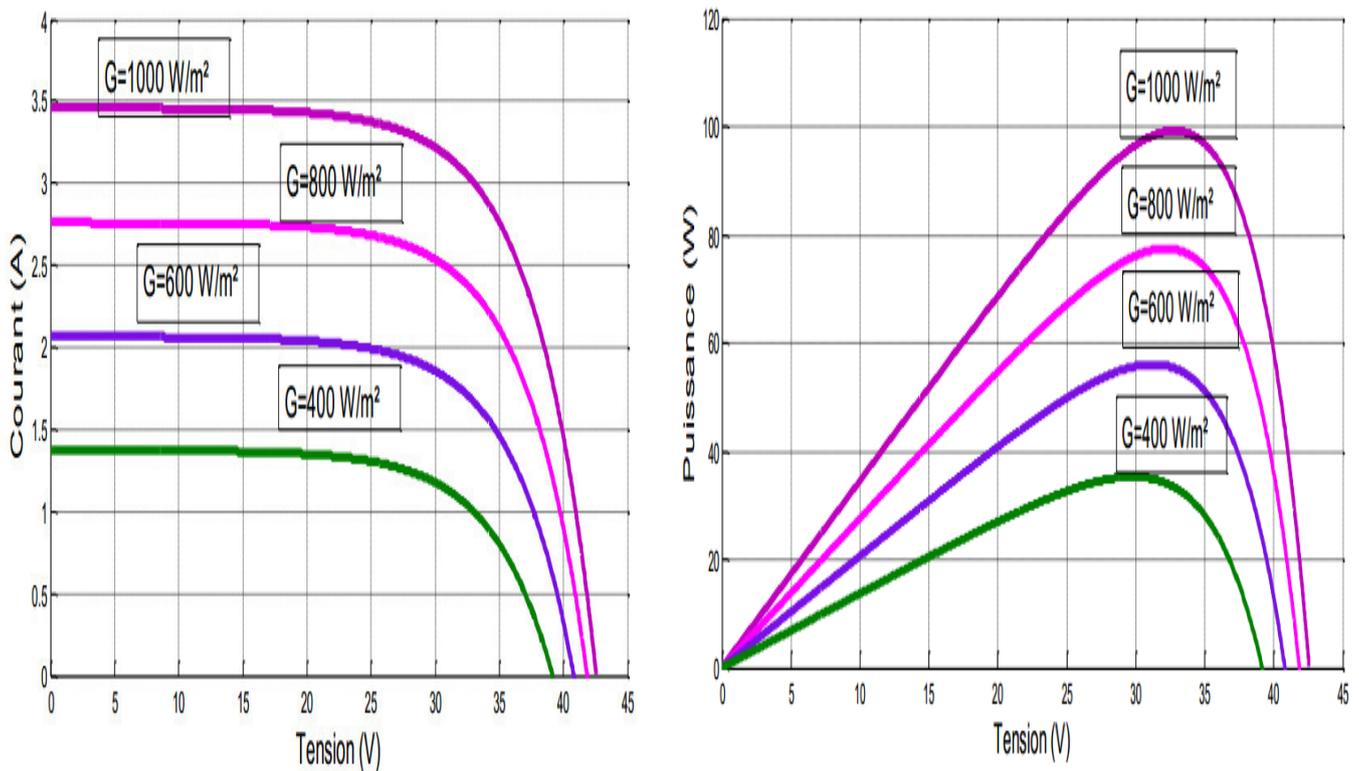
Le courant produit par un module varie conformément. Il dépend de l'éclairement solaire et de la température des modules.



**Figure (II.3) :** Caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$  dans les conditions standards de fonctionnement [BES18].

**II.1.2.1 Influence de l'irradiation :**

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

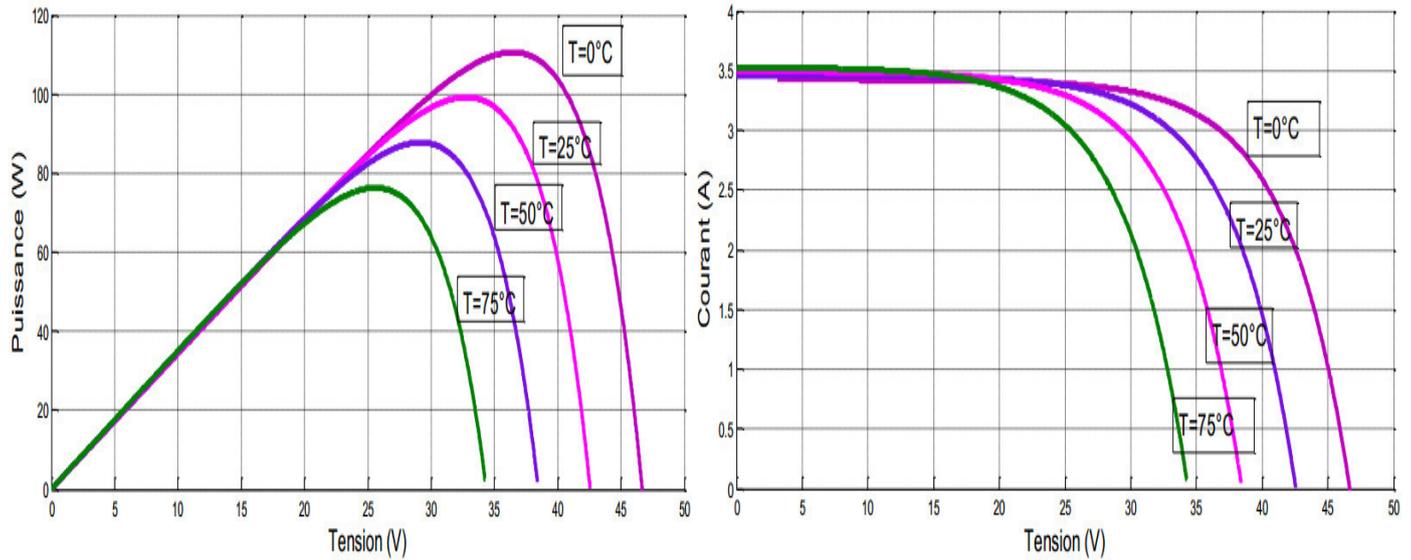


**Figure (II.4) :** Caractéristique courant –tension et puissance –tension d’un module photovoltaïque pour différent niveau d’irradiation ( $G=400, 600, 800, 1000 \text{ W/m}^2$ ) à  $T_c=25^\circ\text{C}$  [SAL17].

- ✓ La variation de l’ensoleillement entraine une diminution de la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible ensoleillement.
- ✓ Le courant produit par la photopile ( $I_{ph}$ ) est pratiquement proportionnel au flux lumineux. Par contre, la tension (V) aux bornes de la jonction varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction (NP) du matériau lui-même.
- ✓ L’ensoleillement à une influence importante sur la valeur de la puissance optimale, car cette dernière chute si l’ensoleillement diminue.

### II.1.2.2 Influence de la température :

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



**Figure (II.5) :** Caractéristique puissance –tension et courant –tension d’un module photovoltaïque pour une variation de température ( $T_c = 0, 25, 50, 75^\circ\text{C}$ ) à  $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$  [SAL17].

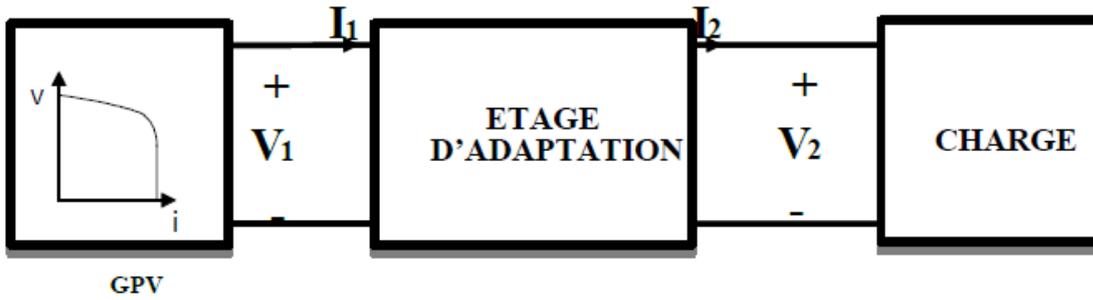
L’influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant-tension d’un générateur photovoltaïque. La tension de circuit ouvert diminue, lorsque la température augmente. Par contre le courant de court-circuit est faiblement dépendant de la température, cela se traduit par une baisse de puissance.

## II.2. Étage d’Adaptation entre un Générateur PV et une Charge :

Un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques I-V non linéaires avec un point de puissance maximum MPP. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d’éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d’extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d’utiliser un étage d’adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge comme présenté dans la figure (II.6).

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 puissance maximale disponible.

Rôle du convertisseur DC-DC fait fonctionner les modules à leur point de puissance optimale, quelques soient l’éclairement et la charge pour délivrer cette puissance à l’utilisation



Figure(II.6) : Etage d'adaptation entre un GPV et une charge

L'adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC).

### II.3 Modélisation du convertisseur statique DC/DC [OTH15] :

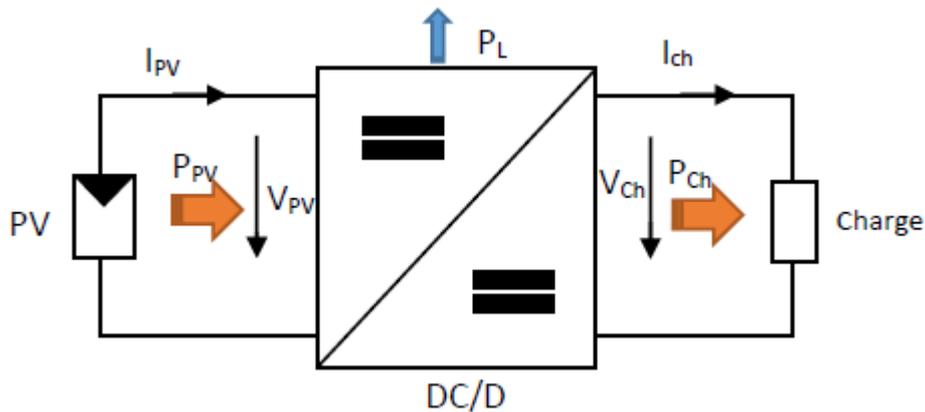


Figure (II.7) : Convertisseurs DC-DC

Le convertisseur (DC/DC) le plus fréquemment utiliser est le convertisseur élévateur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (II.7).

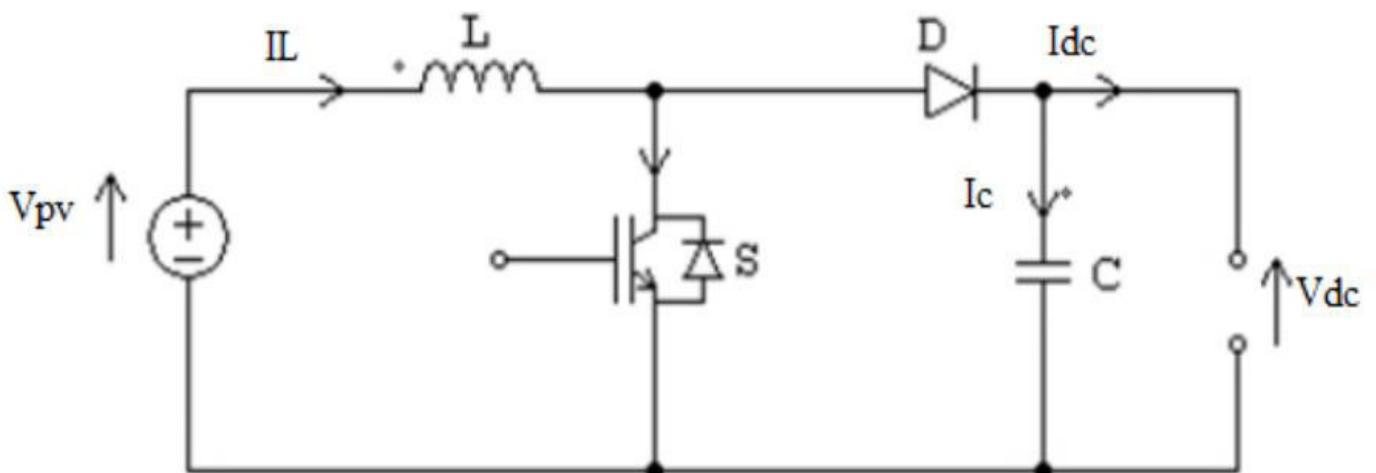


Figure (II.8) : Montage Boost.

L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie.

L'interrupteur S est fermé pendant le temps  $\alpha T$ . L'énergie est stockée dans L, la diode D est bloquée. Le blocage de S entraîne la décharge de l'inductance.

### Principe de fonctionnement :

Le principe du hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source- charge à l'aide d'un interrupteur électronique. Nous avons donc deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur S, que nous pouvons représenter chacune par une équation différentielle.

### Le rapport cyclique : $\alpha$

Le rapport cyclique est défini comme le temps  $t_F$  pendant lequel l'interrupteur est fermé divisé par la période de fonctionnement du montage **T**.

$$\alpha = \frac{t_F}{T}$$

La valeur de rapport cyclique:  $0 \leq t_F \leq 1$

- Lorsque l'interrupteur (S) est fermé:

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{II.11})$$

$$0 = C \frac{dv_{dc}}{dt} + V_{dc} \quad (\text{II.12})$$

- Lorsque l'interrupteur (S) est ouvert :

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{dc} \quad (\text{II.13})$$

$$I_L = C \frac{dv_{dc}}{dt} + V_{dc} \quad (\text{II.14})$$

En posant  $\alpha = 1$  lorsque l'interrupteur S est fermé et  $\alpha = 0$  pour S ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations uniques, que nous qualifions de modèle instantané. Nous considérons ici que les interrupteurs sont parfaits.

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{dc}(1 - \alpha) \quad (\text{II.15})$$

$$(1 - \alpha) I_L = C \frac{dv_{dc}}{dt} + V_{dc} \quad (\text{II.16})$$

Ce modèle est directement utilisable pour réaliser une simulation du convertisseur, dans un environnement de type Matlab/Simulink. En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique  $\alpha$ . Son expression est donnée par l'équation (II.17). La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique  $\alpha$ .

$$V_{dc} = \frac{1}{1-\alpha} V_{pv} \quad (\text{II.17})$$

$$I_{dc} = (1 - \alpha) I_L \quad (\text{II.18})$$

#### II.4 Modélisation de l'onduleur de tension à MLI [LOU09] :

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Les onduleurs utilisés pour le pompage sont en général à fréquence variable, afin de permettre une variation de la vitesse de rotation de la pompe. A partir du schéma de l'onduleur triphasé présenté sur la figure (II.8), on développera les différentes équations qui modélisent le fonctionnement de ce dernier. Pour simplifier l'étude on suppose que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge est équilibrée, couplée en étoile.

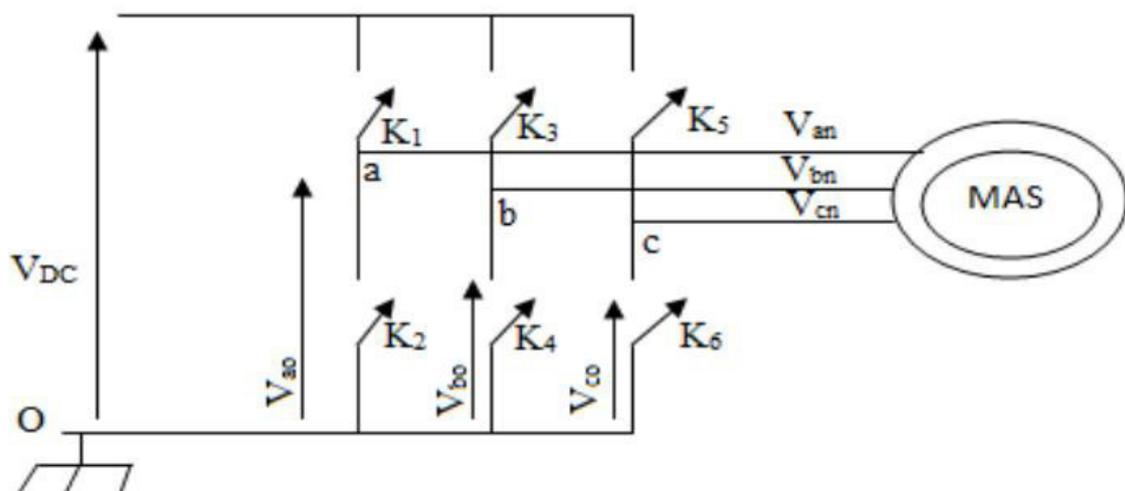


Figure (II.9) : Circuit de l'onduleur relié à la machine.

Nous supposons que les interrupteurs sont idéaux et la charge triphasée est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé :

Les tensions composées  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  et  $V_{ca}$  sont obtenues à partir de ces relations :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$V_{ao}$ ,  $V_{bo}$ ,  $V_{co}$ , sont les tensions à l'entrée de l'onduleur (continues). On a pris le point milieu «O» d'un diviseur fictif à l'entrée comme référence pour ces dernières tensions.

Les trois tensions à l'entrée continue sont données par la relation de Châle comme suit :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Avec :  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$ , et  $V_{cn}$  sont les tensions de phase de la charge, ou de sortie de l'onduleur et  $V_{no}$  est la tension du neutre de la charge par rapport au point fictif «O».

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.21})$$

En remplaçant (II.20) dans (II. 21) on aura :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II.22})$$

En introduisant (II. 22) dans (II.19) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(V_{ao} - 2V_{bo} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(V_{ao} - V_{bo} - 2V_{co}) \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Si on suppose que :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{DC} * S_1 \\ V_{bo} = V_{DC} * S_2 \\ V_{co} = V_{DC} * S_3 \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

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

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Le courant modulé par l'onduleur est donné par :

$$I_{DC} = S_1 * i_{ach} + S_2 * i_{bch} + S_3 * i_{cch} \quad (\text{II.26})$$

Avec :  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  et des fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur pour un seul bras.

## II.5 Modélisation du moteur asynchrone [ABO15] :

La mise en équation de la machine asynchrone est effectuée en adoptant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'entrefer de la machine est supposé constant et symétrique,
- La densité du courant est uniforme dans les sections des conducteurs,
- Le circuit magnétique est supposé non saturé au stator et au rotor,
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température,
- La distribution spatiale des forces magnétomotrices est supposée sinusoïdale le long de l'entrefer,
- Le rotor est à cage et décrit par un enroulement triphasé équivalent.

La loi d'Ohm appliquée aux circuits du stator et du rotor s'écrit sous la forme matricielle suivante:

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (\text{II.27})$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$$[V_s] = [V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^T ; [I_s] = [I_{as} \ I_{bs} \ I_{cs}]^T , [\varphi_s] = [\varphi_{as} \ \varphi_{bs} \ \varphi_{cs}]^T$$

$$[V_r] = [V_{ar} \ V_{br} \ V_{cr}]^T ; [I_r] = [I_{ar} \ I_{br} \ I_{cr}]^T ; [\varphi_r] = [\varphi_{ar} \ \varphi_{br} \ \varphi_{cr}]^T$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} ; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Les hypothèses simplificatrices conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants qui peuvent se mettre sous la forme matricielle suivante :

$$[\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [L_{sr}] \cdot [I_r] \quad (\text{II.29})$$

$$[\varphi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [L_{rs}] \cdot [I_s] \quad (\text{II.30})$$

Avec :

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix}; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}$$

La matrice des mutuelles inductances entre les phases du stator et du rotor est donnée par :

$$[L_{sr}] = [L_{rs}]^T \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Où  $\theta$  représente l'angle électrique que fait l'axe de la phase A du rotor avec celui de la phase a du stator.

En utilisant (II.29) et (II.30), les équations de tension deviennent alors :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dx} \{ [L_{SS}] \cdot [I_s] + [L_{sr}] \cdot [I_r] \} \quad (\text{II.32})$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dx} \{ [L_{rr}] \cdot [I_r] + [L_{rs}] \cdot [I_s] \} \quad (\text{II.33})$$

Les coefficients des équations différentielles (II.32) et (II.33) varient en fonction du temps par l'intermédiaire de l'angle  $\theta$ . La résolution analytique de ce système est donc difficile, mais ils existent plusieurs transformations, telle que la transformation de Park, qui permettent de résoudre ce problème et aboutir à un système différentiel non linéaire à coefficients constants.

Pour simplifier les équations de la machine, la transformation de Park normalisée consiste à transformer la machine asynchrone triphasée équilibrée en une machine biphasée équivalente (d et q) en appliquant aux valeurs des courants, tensions et flux un changement de variables faisant intervenir l'angle  $\beta$  entre les enroulements et l'axe direct d.

Pour les grandeurs statoriques  $\beta = \theta_s$  alors que pour les grandeurs rotoriques  $\beta = \theta_r$ . La matrice de Park est donc donnée par :

$$[P(\beta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \cos\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\beta) & -\sin\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

L'application de la transformation de Park aux équations (II.32) et (II.33) et l'annulation des composantes homopolaires au rotor et au stator, vu que le système est équilibré, il nous permet d'écrire le système d'équations suivant dans un référentiel tournant à une vitesse arbitraire  $\omega_a$ :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + M \frac{dI_{dr}}{dt} - \omega_a (L_s I_{qs} + M I_{qr}) \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + M \frac{dI_{qr}}{dt} - \omega_a (L_s I_{ds} + M I_{dr}) \\ 0 = R_r I_{dr} + L_r \frac{dI_{dr}}{dt} + M \frac{dI_{ds}}{dt} - \omega_r (L_r I_{qr} + M I_{qs}) \\ 0 = R_r I_{qr} + L_r \frac{dI_{qr}}{dt} + M \frac{dI_{qs}}{dt} - \omega_r (L_r I_{dr} + M I_{ds}) \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

Ce système d'équations doit être exprimé dans un référentiel commun. Pour cela, il existe différentes possibilités pour choisir l'orientation de ce repère. Dans notre cas, nous avons choisi comme repère un référentiel fixe par rapport au stator, l'angle entre l'axe **d** et la phase **A** du stator est donc constant et les grandeurs sont sinusoïdales de pulsation égale à celle de l'alimentation. Le système devient alors :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + M \frac{dI_{dr}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + M \frac{dI_{qr}}{dt} \\ 0 = R_r I_{dr} + L_r \frac{dI_{dr}}{dt} + M \frac{dI_{ds}}{dt} - \omega_r (L_r I_{qr} + M I_{qs}) \\ 0 = R_r I_{qr} + L_r \frac{dI_{qr}}{dt} + M \frac{dI_{qs}}{dt} - \omega_r (L_r I_{dr} + M I_{ds}) \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

Le couple électromécanique est donné par l'expression suivante :

$$C_e = P \cdot (\varphi_{ds} \cdot I_{qs} - \varphi_{qs} \cdot I_{ds}) \quad (\text{II.37})$$

Où P est le nombre de paires de pôles.

## II.6 Modélisation de la pompe centrifuge [AMR16] :

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu 03 paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse.

### Équations caractéristiques :

D'une façon générale, les constructeurs de pompes ne donnent pas les paramètres physiques de la pompe. Seule la caractéristique de performance  $H = f(Q)$  est donnée par le constructeur. Ainsi, connaissant les valeurs de la vitesse, hauteur de charge et débit de référence [**modélisation pompe**], il est possible de déterminer celles du système à l'aide des formules empiriques suivantes :

$$N_{sq} = \frac{1000 \left(\frac{N}{60}\right) \sqrt{Q}}{\left(\frac{gH}{N_{ep}}\right)^{3/4}} \quad (\text{II.38})$$

$$Q = K_r N (D_f)^3 \quad (\text{II.39})$$

La pompe oppose un couple résistant donné par :

$$C_r = K_r \cdot \Omega^2 \quad (\text{II.40})$$

Où :

- $\Omega$  : vitesse du moteur asynchrone (rad/s)
- $K_r$  : Un coefficient de proportionnalité [ $(Nm/rad \cdot S^{-1})^2$ ] qui est donné par l'équation suivante :

$$K_r = \frac{P_n}{\Omega_n^3} \quad (\text{II.41})$$

Où :

- $P_n$  : Puissance nominale du moteur asynchrone (W).
- $\Omega_n$  : vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s).
- $N_{sq}$  : Vitesse spécifique du rotor
- $N_{ep}$  : Nombre d'étages de la pompe
- $H$  : hauteur de charge effective en m
- $g$  : L'accélération de la pesanteur = 9.81 N/s<sup>2</sup>
- $\omega$  : vitesse de l'arbre en rad/s
- $Q$  : débit de la pompe en l/s
- $D_f$  : diamètre du forage (ou du puits) en dm
- $K_{sp}$  : constante
- $N$  : vitesse de l'arbre du rotor en tr/min
- $C_r$  : Couple résistant

### • Conclusion :

La modélisation de chaque composant du système de pompage photovoltaïque a été élaborée à partir des modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs (DC/DC, DC/AC)), moteur asynchrone ; pompe centrifuge). Cette modélisation est une étape essentielle, elle va nous permettre d'étudier la commande de ce système dans les chapitres qui suivent.



## **CHAPITRE III**

**commande du système de  
pompage photovoltaïque**

**Introduction :**

Pour la conception d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil, une étude dimensionnelle, et l'application d'une commande (pour l'amélioration des performances statique et dynamique) est nécessaire.

Dans ce chapitre, nous présenterons en premier lieu une méthode de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, qui nous permettra de définir les éléments de notre système, de déterminer le nombre de panneaux nécessaires pour satisfaire les besoins quotidiens en eau.

**III.1 Les étapes de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque [HAD05] :**

- Evaluation des besoins en eau.
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire.
- Détermination de l'énergie solaire disponible.
- Choix des composants.

**III.1.1 Evaluation des besoins en eau [AMR16] :**

L'estimation des besoins en eau c'est la première étape à suivre lors d'un dimensionnement d'une installation du pompage photovoltaïque. Dans le cas de l'irrigation, les besoins d'eau dépendent du type de culture, de la méthode d'irrigation et des facteurs météorologiques (la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, et la saison de l'année en question).

**III.1.2 calcul de l'énergie électrique quotidienne requise [BOU12] :**

L'énergie nécessaire pour soulever une certaine quantité d'eau sur certaine hauteur donnée pendant une journée est calculée à partir de l'équation suivante :

$$E_{ele} = \frac{C_H \cdot Q \cdot HMT}{R_p} \quad (III.1)$$

Avec :

- $E_{ele}$ : Habituellement exprimé en KWh.
- $Q$ : Débit journalier ( $m^3$ / jour)
- $HMT$ : Hauteur manométrique.
- $R_p$ : En général le rendement des groupes motopompes est de 30% et 45%, selon le type de pompe et de moteur [BOU12].

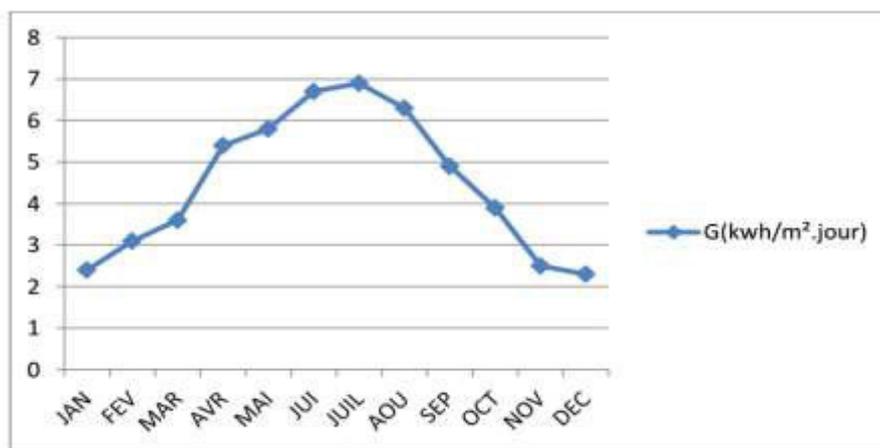
$$C_H = \frac{g \cdot \rho}{3600} = 2.725$$

(III.2)

- $g$  : Constante de gravité ( $9.81 \text{ m/S}^{-1}$ ).
- $\rho$  : La densité de l'eau ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ).

### III.1.3 Détermination de l'énergie solaire disponible :

Il est nécessaire de connaître l'énergie solaire reçue en moyenne par jour sur le site pendant une période donnée [AMR16].



**Figure (III.1) :** Irradiation globale moyenne mensuelle journalière sur plan horizontal du site de Bejaïa de 1998 à 2007 [AMR16]

#### III.1.3.1 Inclinaison et orientation optimale des capteurs photovoltaïques :

L'inclinaison  $\beta$  des modules photovoltaïques (PV) par rapport au plan horizontal doit se faire de manière à optimiser le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire [HAD05].

L'inclinaison optimale est la latitude du lieu plus  $10^\circ$  [HAD05]. Les panneaux doivent constamment maintenir un angle droit avec les rayons du soleil, sinon orienté en plein Sud dans l'hémisphère Nord et plein Nord dans l'hémisphère Sud [HAD05].

#### III.1.3.2 Mois de dimensionnement [BOU12]:

Le mois de dimensionnement sera le mois le plus défavorable, son principe est de réaliser un bilan énergétique sous les conditions les plus défavorables pour le système. C'est-à-dire, si le système fonctionne durant ce mois, il fonctionnera dans les autres mois, donc il nous garantit un fonctionnement annuel. L'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaires correspondantes à ce mois, serviront pour le choix des composants du système.

**III.1.4 Choix des composantes de système :**

**III.1.4.1 Dimensionnement de la pompe centrifuge :**

Dans notre cas le débit journalier sera de  $25 \text{ m}^3/\text{jour}$  et la HMT est estimée à 10 m. La pompe choisie a un rendement de 55%, et l'efficacité du moteur, d'environ 80% au point de fonctionnement nominal. Le rendement total du groupe motopompe ( $R_p$ ) sera donc de 44%. D'après l'équation (III.1) de l'énergie électrique requise par la pompe on aura :

$$E_{ele} = \frac{2,725 \cdot 25 \cdot 10}{0,44} \tag{III.3}$$

$$E_{ele} = 1548.29 \text{ wh/jour}$$

**III.1.4.2 Dimensionnement du champ photovoltaïque :**

D'après la figure (III.1), le mois de décembre est le mois où l'ensoleillement (G) est défavorable pour une inclinaison de  $36.43^\circ$ , c'est-à-dire un maximum de 2.2 heures de soleil par jour. En supposant des pertes de 20% attribuables à la température, à la poussière et au rendement de l'onduleur, dans ce cas la puissance ( $P_c$ ) du champ photovoltaïque se calculera comme suite :

$$P_c = \frac{E_{ele}}{\tau_p(1-pertes)} \tag{III.4}$$

$$P_c = \frac{158.29}{2,2(1 - 0,2)} = 987.7 \text{ W}$$

Pour des panneaux de types Siemens 110W,  $V_{opt} = 35 \text{ V}$ ,  $I_{opt} = 3.15 \text{ A}$ , le nombre de panneaux à utiliser peut se calculer de la manière suivante :

$$N_{pv} \geq ENT \left[ \frac{P_c}{P_{pv,u}} \right] \tag{III.5}$$

$$N_{pv} \geq ENT \left[ \frac{879.7}{110} \right] = 8$$

Pour 8 panneaux photovoltaïques la puissance totale sera égale :

$$P_{pv,tot} == 8 * 110 = 880W \tag{III.6}$$

On branche les panneaux en parallèle. Parce que (les caractéristiques du moteur asynchrone utiliser :

$$P_n = 746 \text{ W}, I_n = 3.4 \text{ A}.$$

La tension à la sortie du générateur photovoltaïque totale sera :

$$V_{pv,tot} = N_{pv} \cdot V_{opt} \tag{III.7}$$

$$V_{pv,tot} = 8 * 35 = 280V$$

Le courant à la sortie de générateur photovoltaïque totale sera :

$$I_{pv} = \frac{P_c}{V_{max}} = 3.14285 A \approx 3.15 A \tag{III.8}$$

### III.2 La commande du point de puissance maximum (Maximum Power Point Tracking):

Par définition, une commande MPPT (maximum power point tracking), associé à un convertisseur DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quels que soit les conditions météorologiques (irradiation, température), cette commande ainsi place le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{opt}, I_{opt}$ ). Le premier système de puissance MPPT à été introduit en 1968 pour un système spatial. Au cours des années, plusieurs algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés pour déterminer le point de puissance maximum [LAL09].

#### III.2.1 Méthode « Perturbation et Observation » :

C'est la méthode la plus utilisée du fait de sa simplicité : une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée (augmentée ou diminuée) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes du panneau est augmentée du fait de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction. Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé [ROY98].

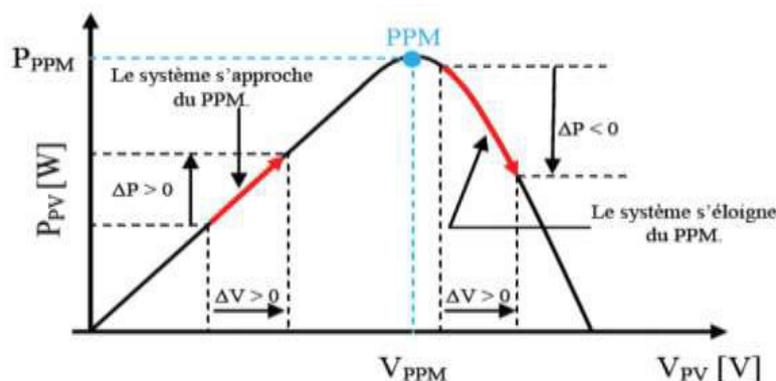


Figure (III.2) : caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$  d'un panneau solaire [ROY98].

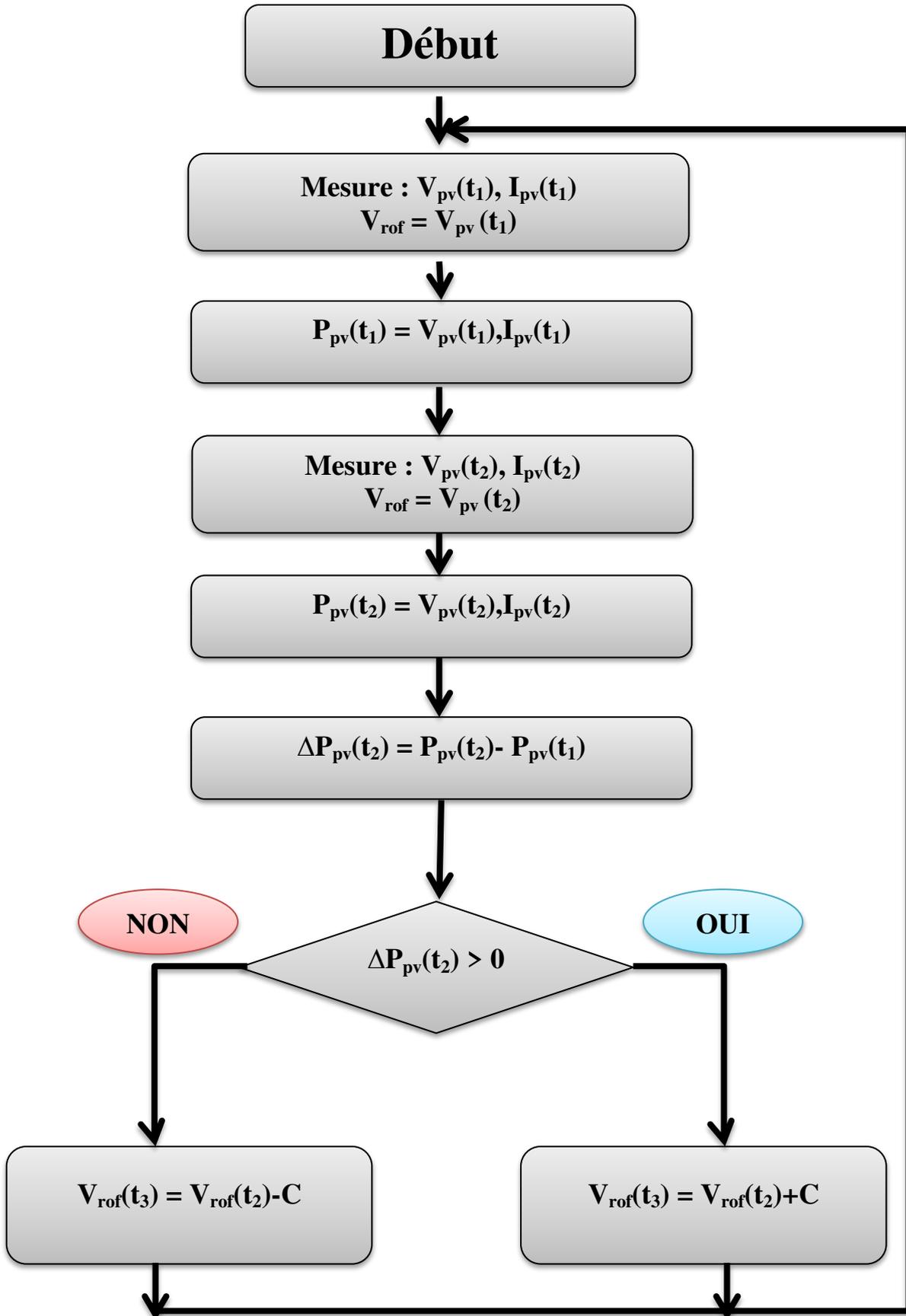


Figure (III.3) : Diagramme fonctionnel algorithme "perturbation et observation"

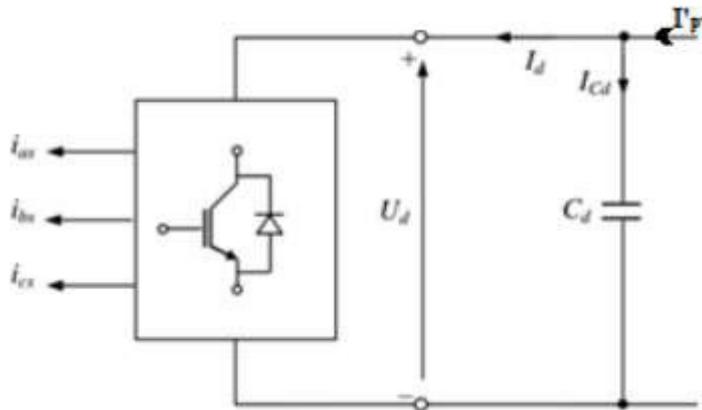
[BEL12]

Un organigramme de fonctionnement de cette méthode est montré dans la figure (III.3). Les avantages de cette méthode peuvent être récapitulés comme suit: la connaissance des caractéristiques du générateur photovoltaïque n'est pas exigée, c'est une méthode relativement simple. Néanmoins, en régime permanent, le point de fonctionnement oscille autour du MPP, provoquant ainsi une perte d'énergie.

**III.3 Modélisation du bus continu [BOU10]:**

Pour réduire les fluctuations de la tension du réseau, on utilise couramment une capacité de filtrage (ou de découplage). Celle-ci matérialise le bus continu qui est traversé par tous les flux énergétique du réseau. Une augmentation de la taille de cette capacité permet de diminuer l'interaction entre les différents éléments interconnectés au bus continu mais cette solution conduit à une augmentation du volume, du poids et du coût du système. Ces notions sont des critères importants pris en compte dans la phase de conception de certaines applications, et une telle solution n'est pas envisageable. Une autre solution consiste d'agir sur la commande des convertisseurs afin de réguler la tension du bus continu .Cette solution permet une diminution significative de la taille de la capacité du bus continu et un gain important à la fois en volume et en poids. En revanche, une modélisation du bus continu est indispensable pour mettre en place une stratégie de réglage.

Le schéma équivalent des différents éléments interconnectés au bus continu est illustré sur la figure (III.4).



**Figure (III.4) :** schéma équivalent des éléments interconnectés au bus continu

Le courant du bus continu s'exprime en fonction des courants du côté alternatif et de l'état des bras du convertisseur par :

$$I_d = S_a \cdot i_{as} + S_b \cdot i_{bs} + S_c \cdot i_{cs} \tag{III.9}$$

Où :

- $i_{as}$ ,  $i_{bs}$  et  $i_{cs}$  sont des courants statoriques de la machine. Cette relation montre l'influence des états de commutation sur le courant du bus continu, d'où la nécessité du filtrage.

Ce courant s'exprime également en fonction des courants côté continu par :

$$I_d = -(I_{cd} + I_{pv}) \quad (\text{III.10})$$

Où :

- $I_{cd}$  désignent le courant circulant dans la capacité de filtrage  $C_d$ .

En substituant la relation liant le courant circulant dans la capacité avec la tension du bus continu. On trouve:

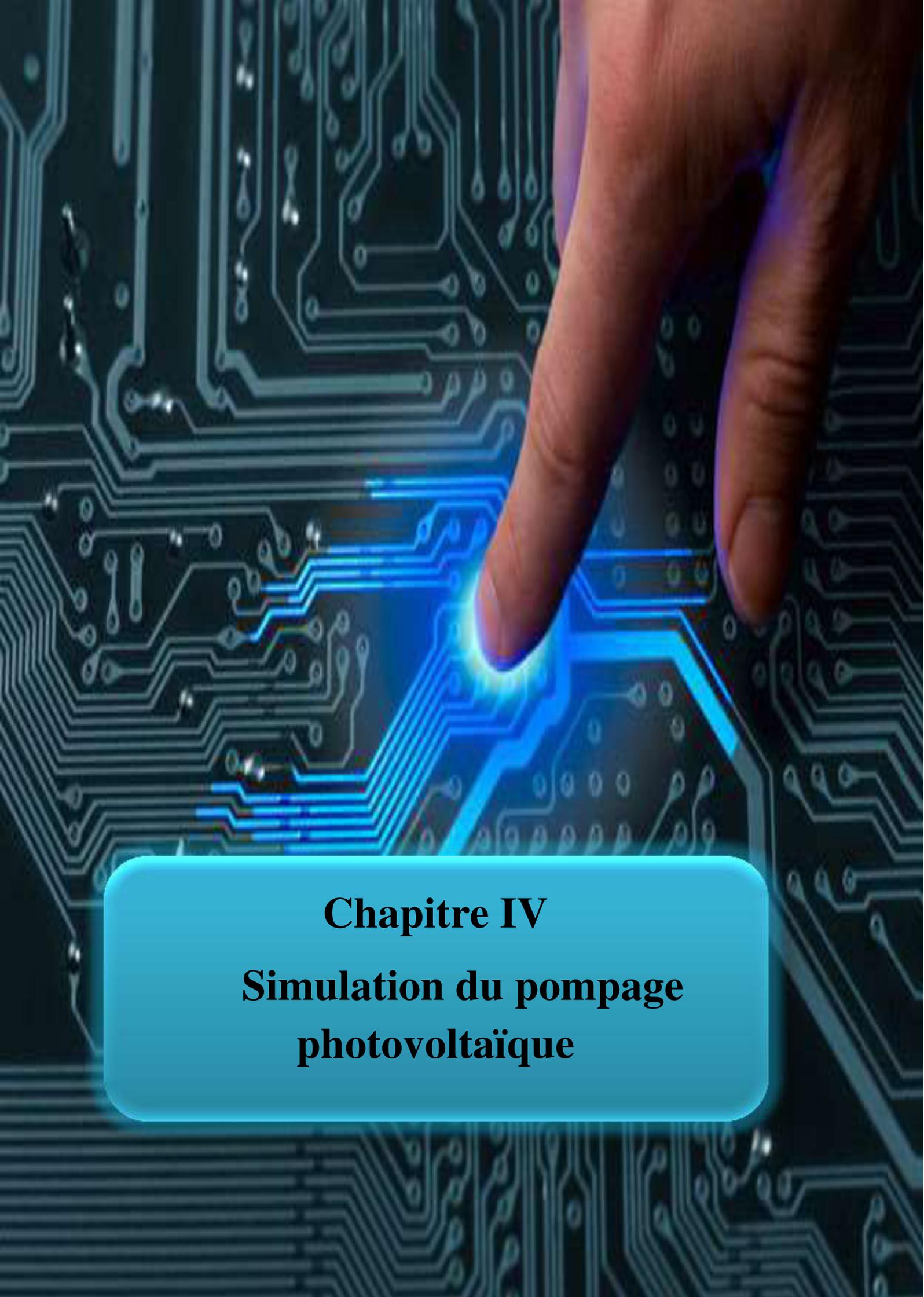
$$I_{cd} = -C_d \frac{dU_d}{dt} \quad (\text{III.11})$$

Cette dernière expression donne l'évolution dynamique de la tension du bras continu.

$$T_{em} = p(\varphi_{s\alpha} \cdot i_{s\beta} - \varphi_{s\beta} \cdot i_{s\alpha}) \quad (\text{III.12})$$

### Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons dimensionné les différents composants du système de pompage PV, à savoir la pompe centrifuge et son moteur asynchrone d'entraînement, Ainsi que le nombre de panneaux nécessaire pour satisfaire les besoins en eau d'irrigation. Aussi on a défini la commande a utilisé dans notre système PV, la commande MPPT «P&O » du convertisseur (DC-DC) pour obtenir le point de puissance maximale du GPV

A hand is shown pointing at a glowing blue circuit board. The background is a dark blue circuit board with intricate white and blue traces. The hand is positioned in the upper right quadrant, with the index finger pointing towards the center. The circuit board has a glowing blue effect, particularly around the point where the finger is touching it.

**Chapitre IV**  
**Simulation du pompage  
photovoltaïque**

## Introduction

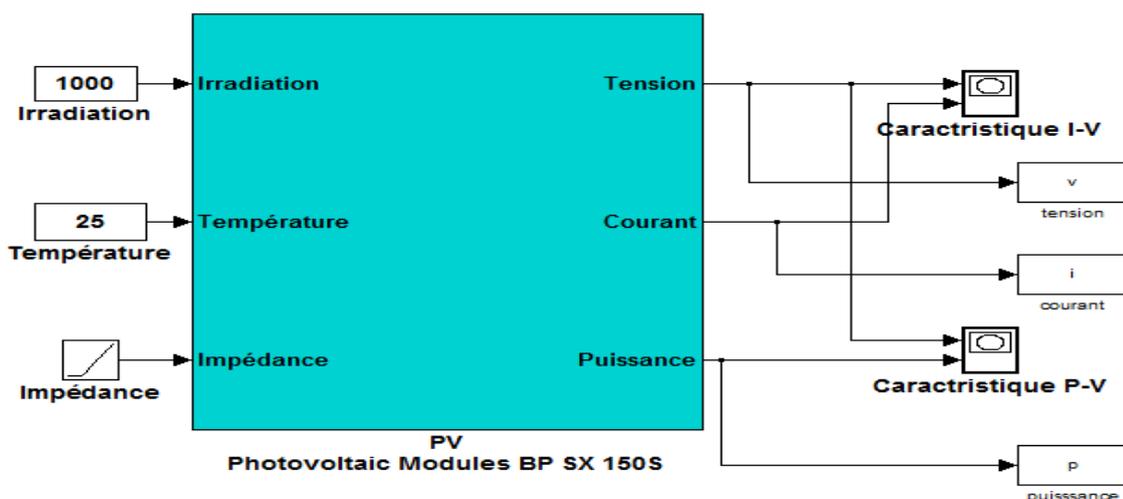
L'objectif de ce dernier chapitre est de faire la simulation numérique sous MATLAB/SIMULINK de notre système de pompage photovoltaïque. La simulation est basée sur l'élaboration des modèles mathématiques, qui nous permet d'avoir une approche globale des performances du système. Ce dernier est constitué d'un moteur asynchrone accouplé à une pompe centrifuge. L'ensemble est alimenté par un générateur photovoltaïque (GPV) composé de 36 cellules PV, avec stratégies de commande ont été mise en œuvre basée sur la mesure de courant et de tension photovoltaïque pour assurer le fonctionnement du GPV à sa puissance maximale via la commande MPPT de type « P&O » du hacheur survolteur. et stratégie permet de régler à la fois l'amplitude et la fréquence en gardant la source continue constante via le signal de commande modulation de largeur d'impulsion du onduleur (pont à diode).

### IV.1 logiciel de la simulation MATLAB/SIMULINK 2011 :

MATLAB est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple. Avec ses fonctions spécialisées, et est un langage de développement informatique particulièrement dédié aux applications scientifiques. et utilisé pour développer des solutions nécessitant une très grande puissance de calcul.

SIMULINK est l'extension graphique de MATLAB permettant de représenter les fonctions mathématiques et les systèmes sous forme de diagramme en blocs, et de simuler le fonctionnement de ces systèmes.

### IV.2.Fonctionnement de générateur photovoltaïque à sa puissance maximale :

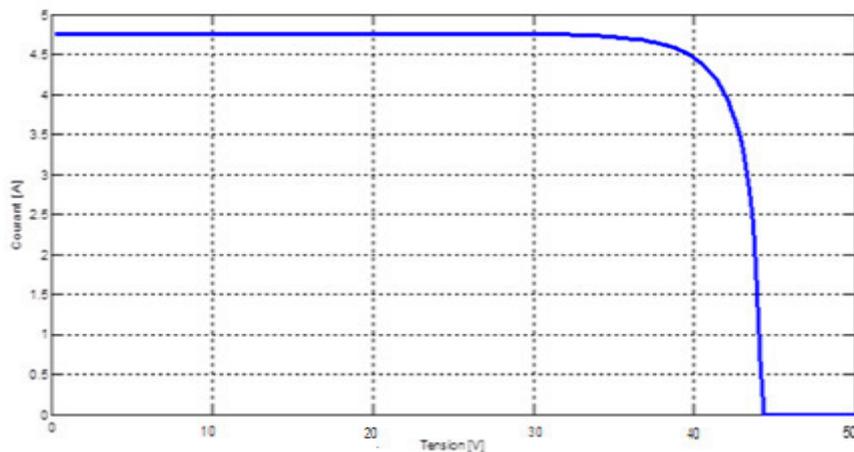


Figure(IV.1) : Schéma Simulink du module solaire

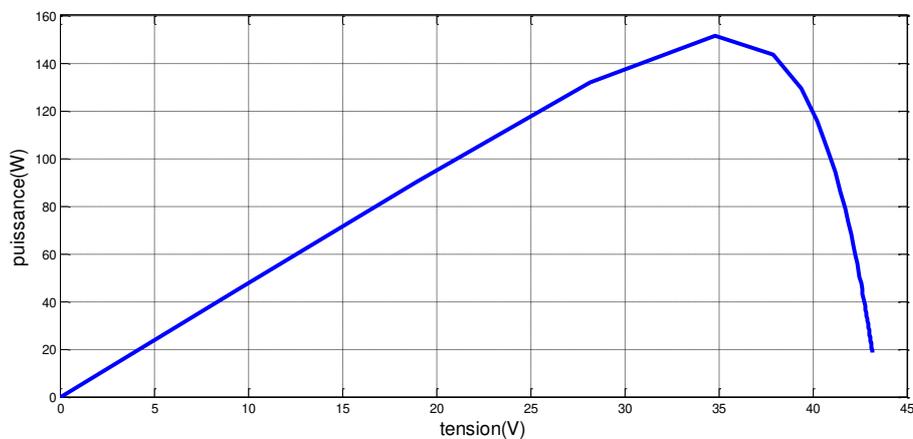
Puissance maximale (W)	150
Tension a vide (V)	43.5
Courant de cout circuit (A)	4.75
Tension au point de maximum de puissance (V)	34.5
Courant au point de maximum de puissance (A)	4.35
Nombre de cellules	36

**Tableau IV-1: Caractéristiques électriques du module PV**

Notre générateur photovoltaïque (GPV) est composé de 36 cellules photovoltaïques connectés en serie. Les allures de la puissance PV, de la tension et du courant dans les conditions stc ( $G=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ ) sont représentées sur les figures ci-dessous



**Figure (IV.2) : Caractéristique I(V) d'un panneau**



**Figure (IV.3) : Caractéristique P(V) d'un panneau**

**Interprétation des résultats :**

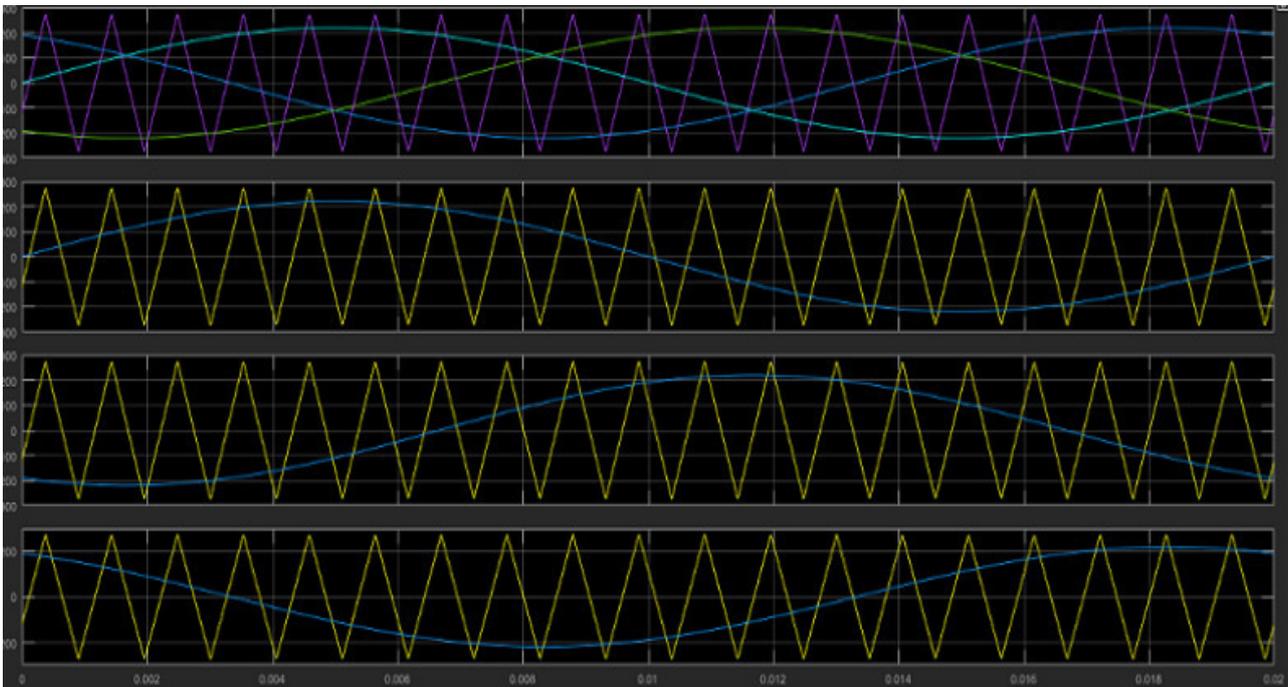
Les figure (IV.1) et (IV.2) représente les Caractéristique  $I = f(V)$  &  $P = f(V)$  d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

Pour la figure (IV.1) on remarque que le courant est constant jusqu'à atteindre la valeur de tension  $V_{co}$  ensuite il décroît.

Pour la figure (IV.2) On remarque que, quand la tension augmente la puissance augmente jusqu'à atteindre la valeur optimale ( $P_{max}=900W$ ) ensuite elle décroît.

**IV.3. Simulation du système de pompage photovoltaïque connecté au générateur photovoltaïque :**

Les figures ci-dessous représentent les résultats de simulation de notre système de pompage photovoltaïque contrôlé par la commande MPPT Dans les conditions d'éclairement  $G=1000W/m^2$  et de température  $T=25\text{ c}^\circ$



**Figure (IV.4) :** Courbes d'interaction du signal de la porteuse triangulaire avec les tensions de référence ( $V_a, V_b, V_c$ ).

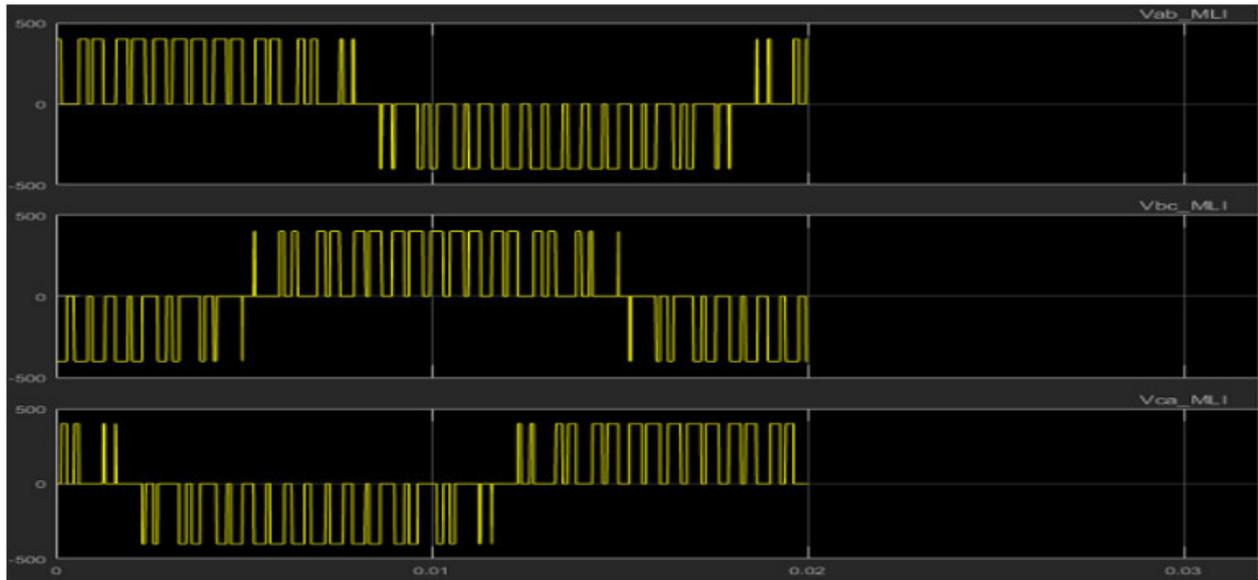


Figure (IV.5) : Courbes des tensions composées MLI.

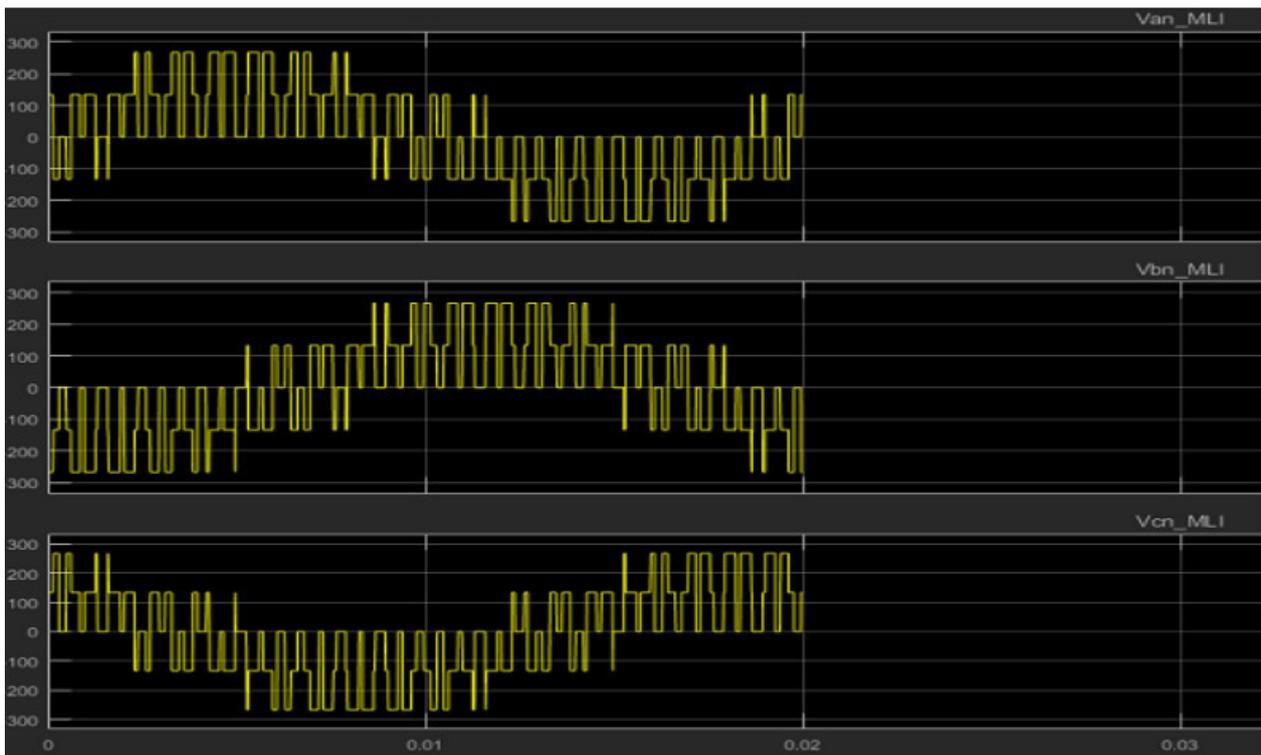


Figure (IV.6) : Courbes des tensions simple MLI.

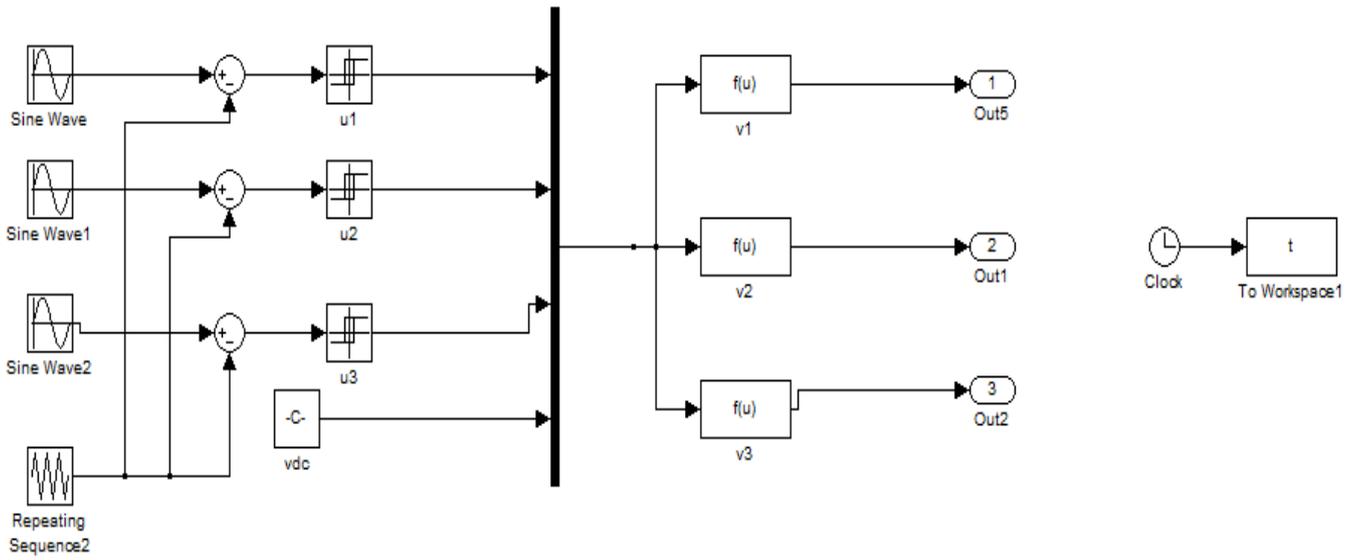


Figure (IV.7) : Schéma Simulink de l'onduleur MLI.

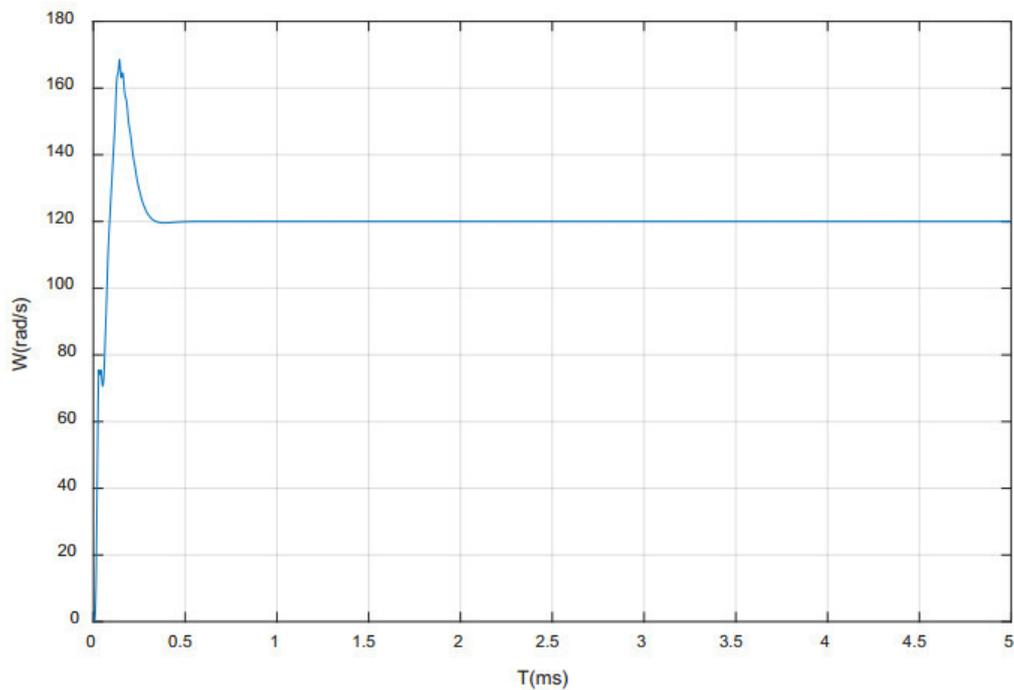
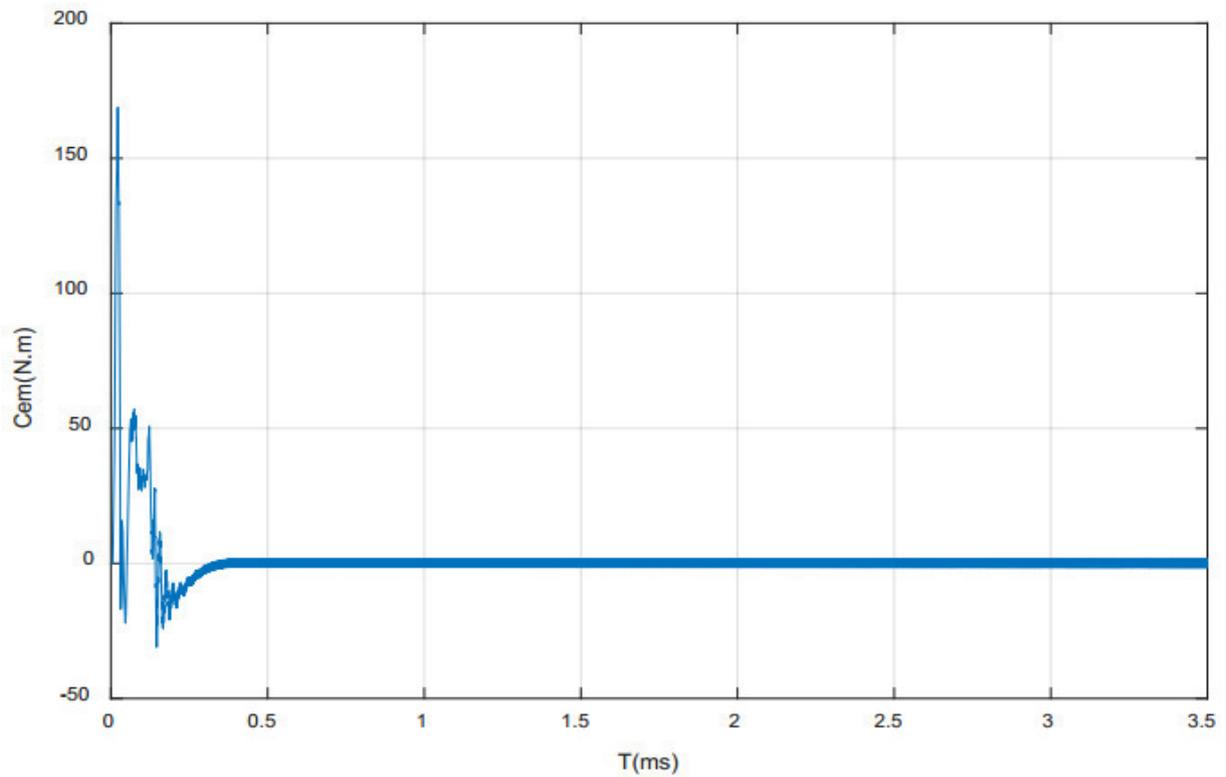
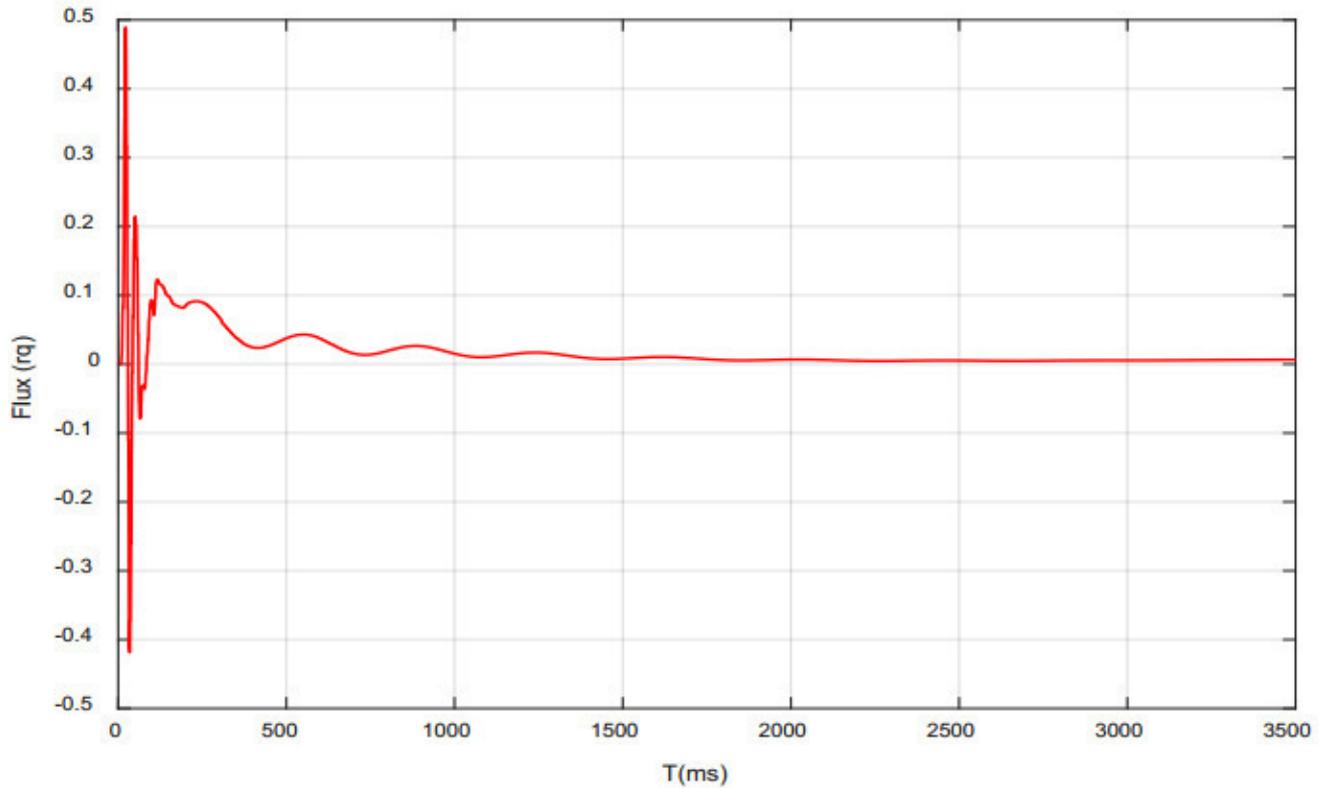


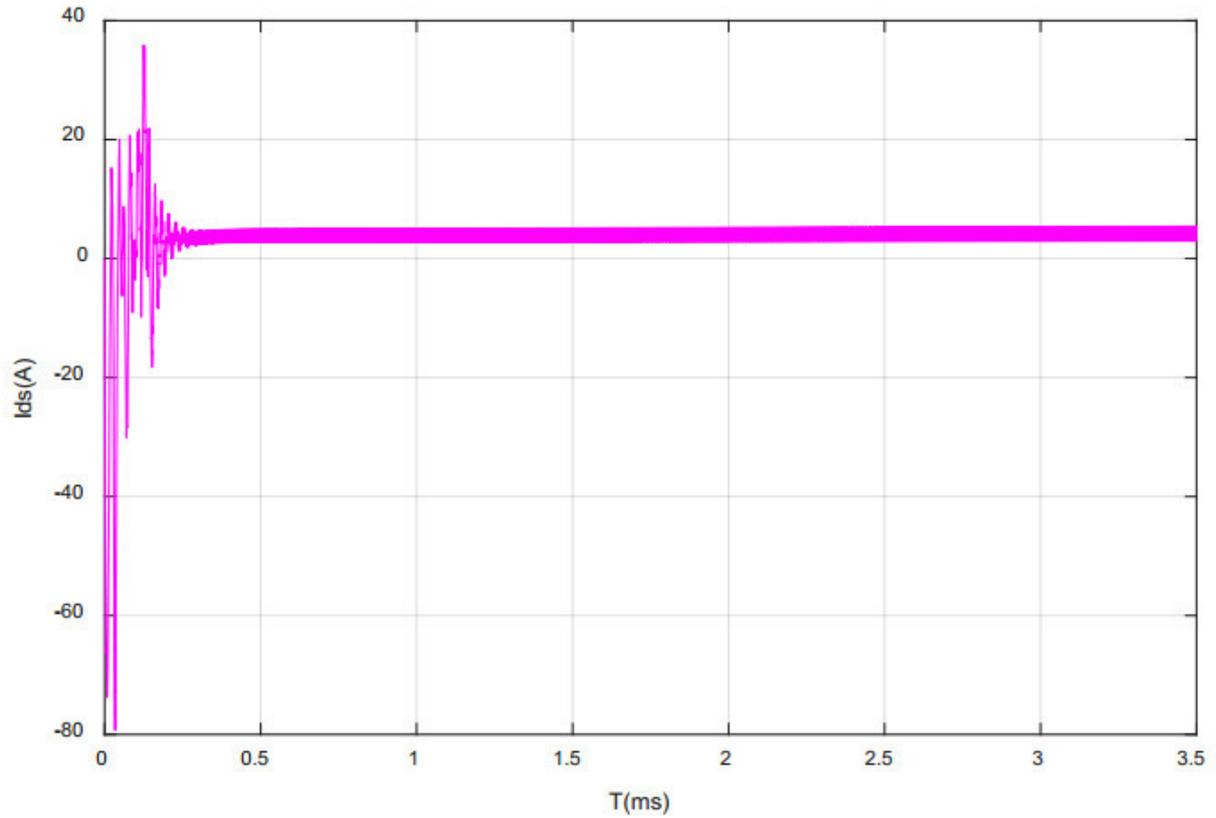
Figure (IV.8) : Courbe de la variation de vitesse  $W(\text{rad/s})$  en charge en fonction de temps.



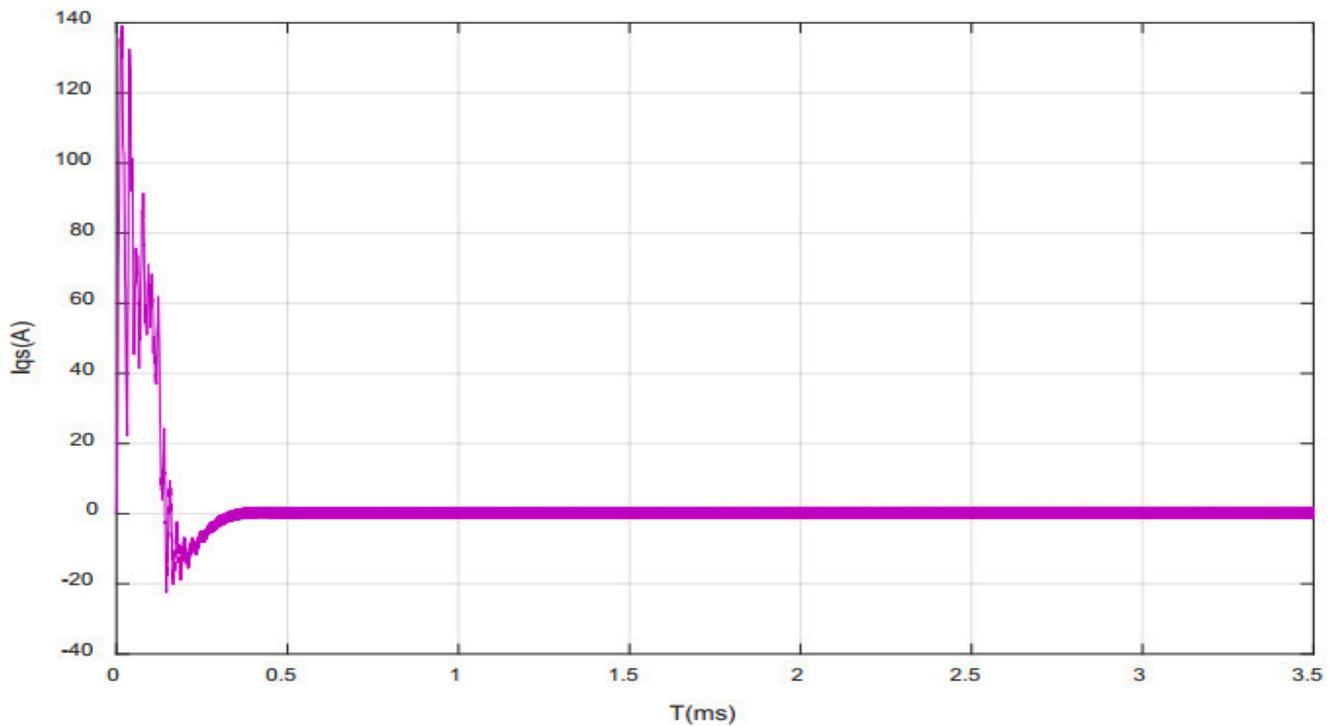
**Figure (IV.9) :** Courbe de la variation du couple moteur( $C_{em}$ ) en fonction de temps.



**Figure (IV.10) :** Courbe la variation du flux ( $\Phi_{rq}$ ) en fonction de temps.



**Figure (IV.11)** : Courbe de variation du courant statorique ( $I_{ds}$ ) en fonction de temps.



**Figure (IV.12)** : Courbe de La variation du courant statorique ( $I_{qs}$ ) en fonction de temps.

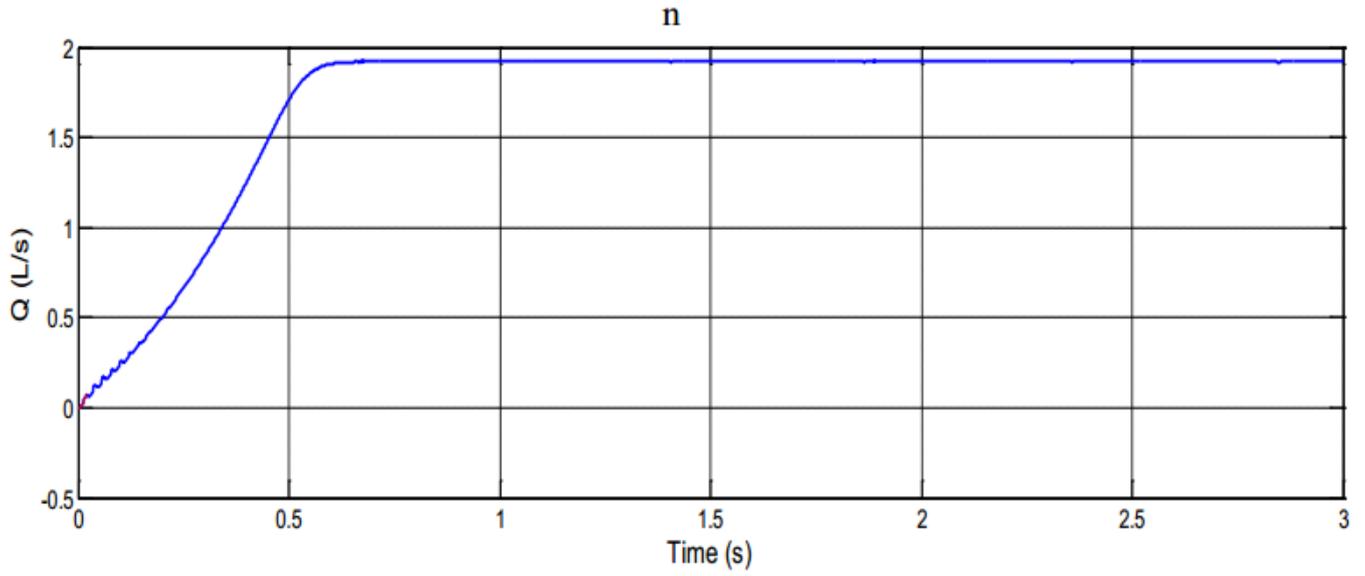


Figure (IV.13) : Courbe de La variation du débit de la pompe en fonction de temps.

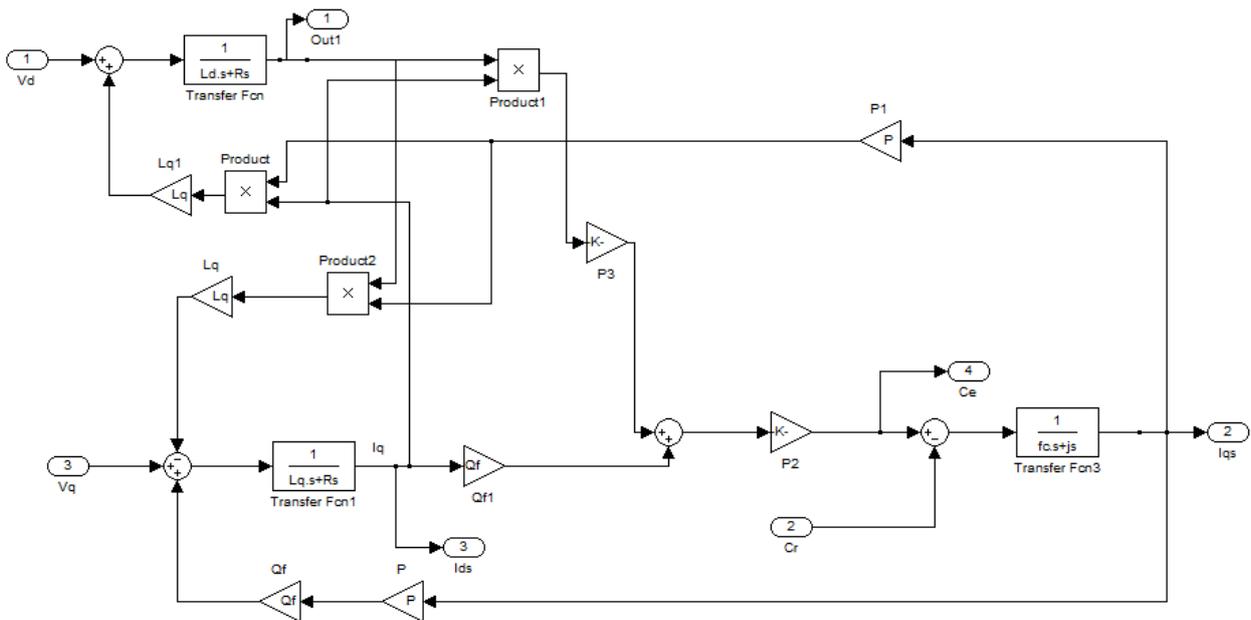


Figure (IV.14) : Schéma Simulink de la machine

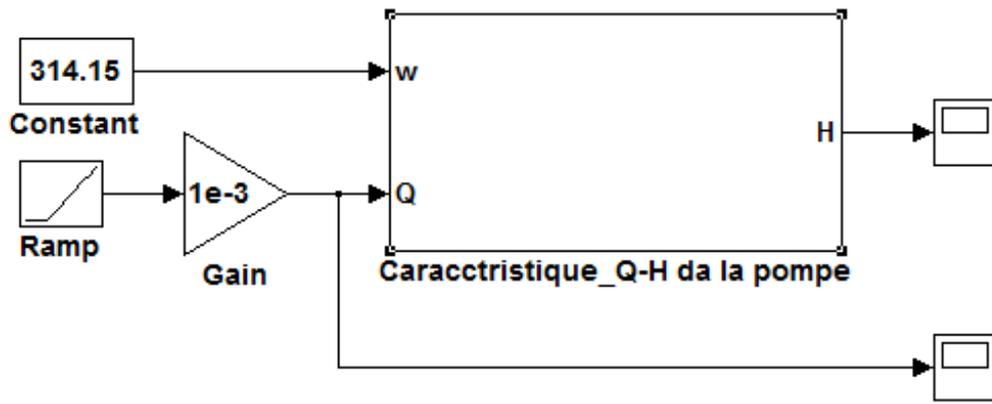


Figure (IV.15) : Schéma Simulink de la pompe avec les caractéristiques Q-H

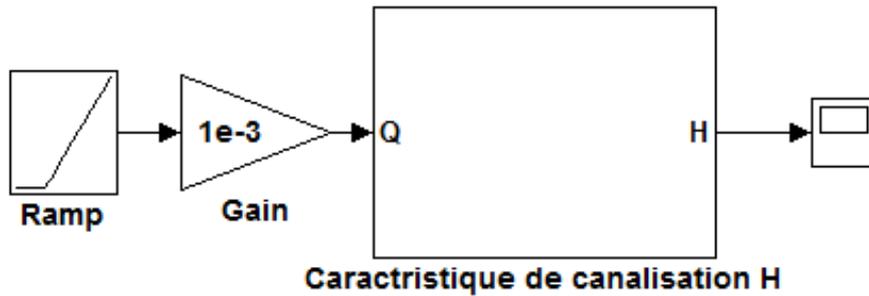


Figure (IV.16) : Schéma Simulink de la pompe avec les caractéristiques H

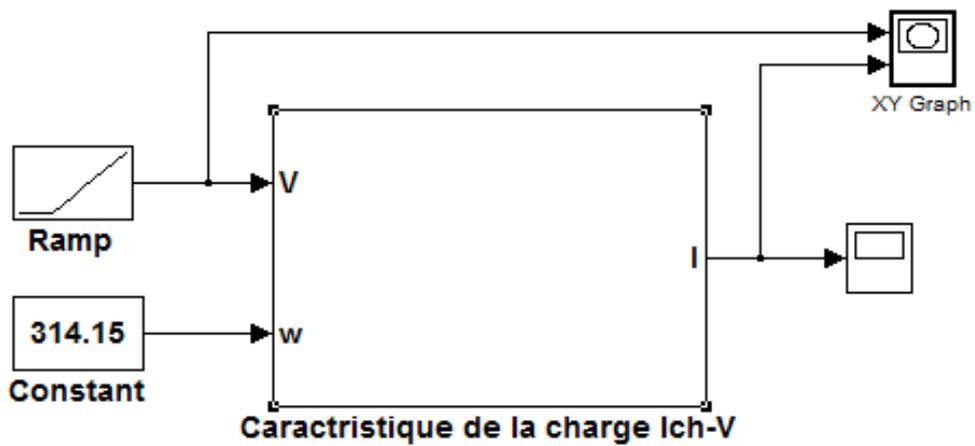


Figure (IV.17) : Schéma Simulink de la pompe avec les caractéristiques Ich-V

Il est remarquable que la variation des paramètres des blocs moto-pompe (moteur et pompe centrifuge) est proportionnelle celles des blocs de commande (GPV, Hacheur et onduleur) donc lorsque l'éclairement augmente plus le courant augmente aussi, et comme la puissance est proportionnelle au courant, il est évident que l'énergie électrique nécessaire est liée avec l'énergie hydraulique fournie par la pompe.

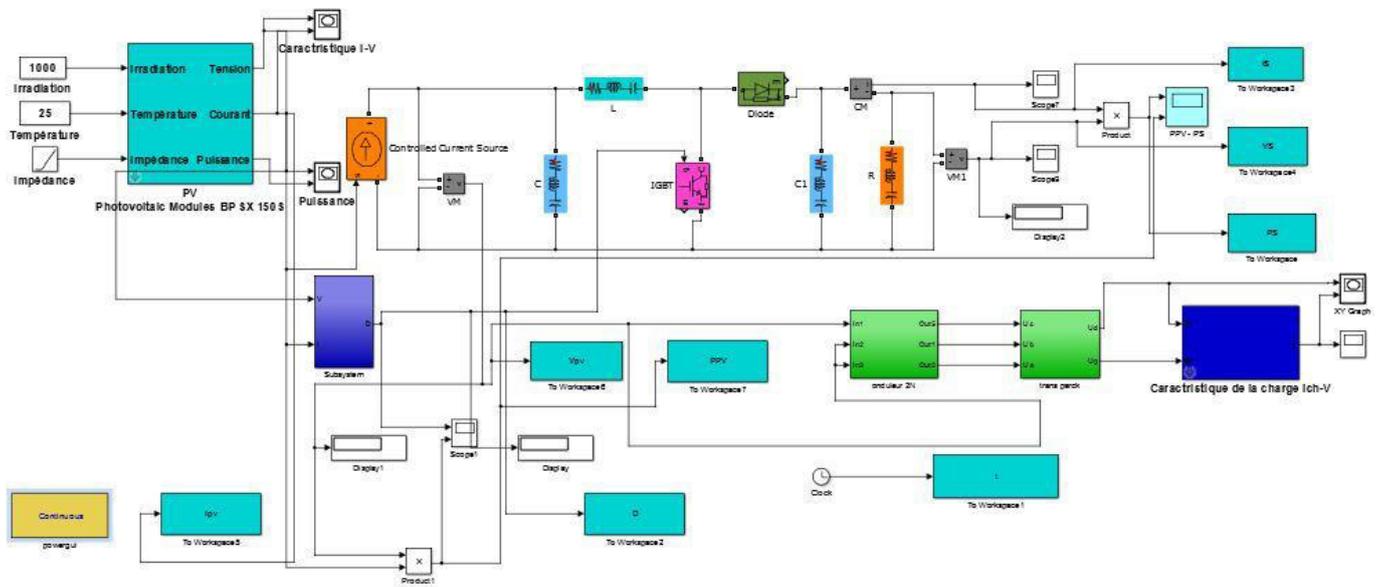
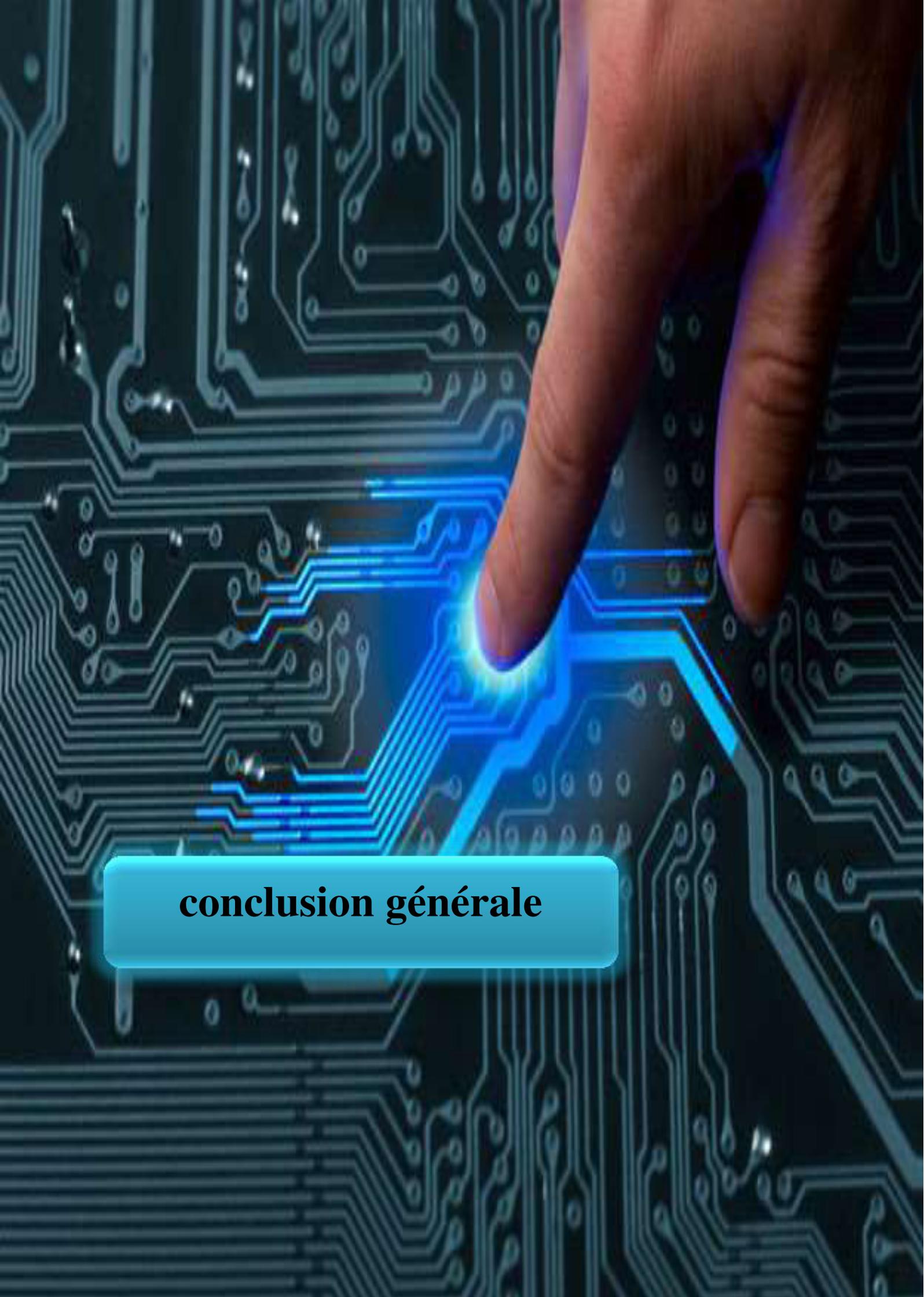


Figure (IV.18) : Schéma complet de l'installation réalisée de pompage PV.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons élaboré sous Matlab 2011 la simulation des différents blocs du pompage photovoltaïque. On a commencé par le module solaire de notre système de type : **BP SX 150S**, dont nous avons obtenu les différents courbes de simulation [ $I=f(V)$  ;  $P=f(V)$ ...ex] Après la simulation de différents blocs, nous avons terminé par les différentes courbes du moteur asynchrone à cage et la pompe centrifuge.

A close-up photograph of a person's hand pointing at a glowing blue circuit board. The hand is positioned in the upper right quadrant, with the index finger pointing towards the center. The circuit board is dark with intricate white and blue traces. A bright blue glow emanates from the point where the finger touches the board, spreading outwards. The background is dark, making the glowing traces stand out.

**conclusion générale**

### Conclusion générale :

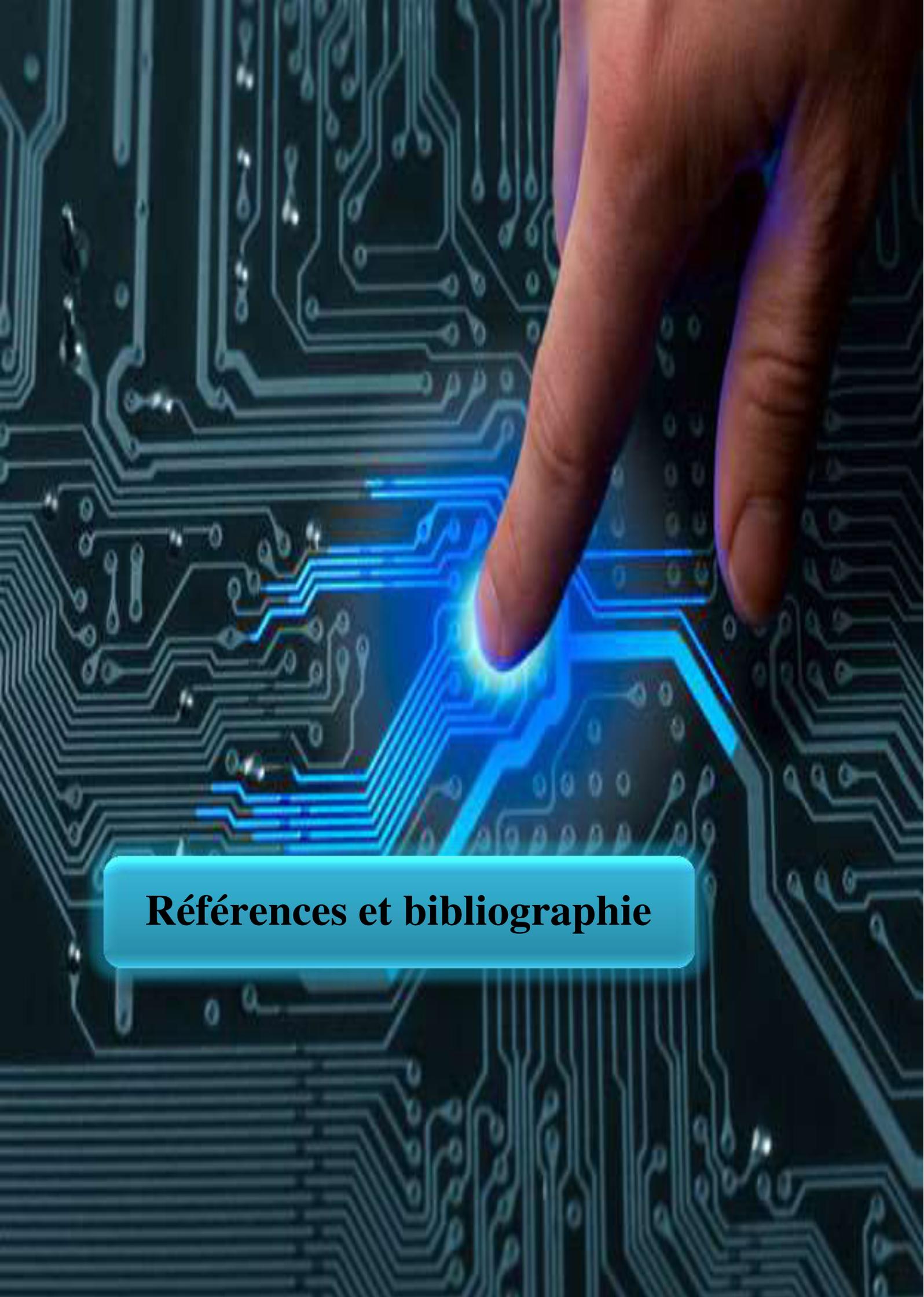
Notre travail c'est porté sur modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque. Le système proposé se compose: d'un générateur photovoltaïque, deux convertisseurs statiques et un groupe motopompe. Le premier de ces deux convertisseurs, est un Hacheur survolteur, est commandé par un algorithme MPPT pour obtenir le point de puissance maximale. Le deuxième est un onduleur triphasé qui sert à convertir le courant continu en courant alternatif pour alimenter le groupe motopompe (moteur asynchrone, pompe centrifuge). Aussi il est souvent plus économique de construire un réservoir pour stocker l'eau plutôt que de stocker l'électricité dans des batteries, le moteur de notre pompe solaire fonctionnera au fil du soleil.

Le premier chapitre de ce travail a été consacré à un état de l'art sur l'énergie photovoltaïque et les systèmes de pompes PV. A la fin de ce chapitre, nous avons choisi les différents éléments du système à étudier.

Le second chapitre nous nous sommes intéressés à la modélisation de tous les éléments de notre chaîne de pompage photovoltaïque chaque modélisation est basée sur des équations provenant de la littérature scientifique.

Au début du troisième chapitre nous avons défini toutes les étapes à suivre pour le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque puis nous avons dimensionné notre chaîne de pompage PV, enfin nous avons présenté la commande MPPT « P&O » avec la quelle notre générateur photovoltaïque sera optimisé.

L'objectif de ce dernier chapitre est la commande du système de pompage photovoltaïque, on appliquant une commande MPPT de type « P&O » pour l'optimisation de la puissance photovoltaïque, Nous avons eu des résultats de simulations pour des conditions variables d'ensoleillement et température et ces derniers confirment les performances souhaitées une bonne dynamique rapide.

A hand with a finger pointing towards a glowing blue circuit board pattern. The background is dark with intricate white and blue circuit traces. The finger is positioned over a bright blue, glowing section of the circuit.

## **Références et bibliographie**

## Références et bibliographie

- [**ABO15**] : S. Abouda « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques application aux pompes ». Thèse Doctorat en cotutelle, université de Reims Champagne-Ardenne et de l'université de Sfax, année 2015.
- [**AMM12**]: H. Ammar, M.T. Bouziane et Y. Bakelli « Influence de la variation de débit sur les performances d'une pompe solaire ». Revue des énergies renouvelables SIENR' 12 Ghardaïa pp 23-28, 2012.
- [**AMR16**] : R. Amrouche et S.Bedjou « Contrôle d'un système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Master université de Bejaia 2016.
- [**ANK12**]: M. Anki et A. Bouallag « Contribution à l'étude et à l'optimisation d'un système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Master université de Bejaia 2012.
- [**AOU14**] : S. AOUI « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque ». Thèse Magister université Sétif 1, 2014.
- [**BAK12**]: Y. Bakelli. A. Hadj Arabe et B. Azzoui « Modélisation d'un groupe moteur pompe dans le banc d'essai de pompage photovoltaïque de l'URAER Ghardaïa ». Revue des énergies renouvelables, vol : 15 No 1, pp 103-109, 2012.
- [**BEL08**] : M.Belhadj « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome. » Mémoire Magister Centre Universitaire de Bechar 2008.
- [**BEL12**] : A. Belhocine et S.Zaidi « Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome » Mémoire de Master. Université de Bejaïa, 2012.
- [**BEN14**]: F. Bendjoudi et F. Lakhdari « Etude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries ». Mémoire de Master université Bejaia 2014.
- [**BES18**]: M. BESSEM ABDELGHANI. « Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque», Mémoire Master, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA 2018.
- [**BOU10**] : A. Boussekine, N. Guermouche « Contribution à l'étude des systèmes de Pompage photovoltaïque ». Mémoire d'ingénieur d'état. Université de Bejaia 2010.
- [**BOU12**] : L. Boudrahem et L. Djouadi « Commande non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque » Mémoire de Master, université de Bejaia 2012.
- [**CHI08**] : A. Chikhi « Commande direct du couple du moteur asynchrone-apport de la logique floue ». Mémoire Magister université Batna, 2008.
- [**DAO13**] : A. Daoud « Contrôle de la puissance d'un générateur photovoltaïque pour le pompage solaire ». Thèse Doctorat université d'Oran 2013.
- [**DJA16**] : L. Djaghдали « Contribution à la commande prédictive direct du couple de la machine à induction ». Thèse Doctorat université Batna 2, 2016.

## Références et bibliographie

[DJE10] : K. Djermouni « Etude d’algorithmes MPPT appliqués aux systèmes de pompage photovoltaïque ». Mémoire Master 2 université de Bejaia 2010.

[ELB06] : A. Elbacha, M. T. Lamchichi, M. Cherkaoui – « Contrôle direct de couple d’une machine asynchrone, système de régulation de vitesse avec anti emballement », Physical and Chemical News, ISSN 1114-3800, 2006, pp. 128-134.

[HAD05]: A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Ghabi "Dimensionnement d’un système de pompage photovoltaïque”. Revue des énergies renouvelables vol. 8, 2005.

[HAN14] : F. Haninou et A. Rouabah « Modélisation et simulation d’un système de pompage photovoltaïque » Mémoire Master 2 université Ouargla 2014.

[KAT11]: G. Katchning et S. Julien « Simulation d’un système de pompage photovoltaïque ». Projet de pompage photovoltaïque à l’université de Lille1, 2011.

[KEH12] : N. Kehoul et K. Khentache « Etude comparative des modèles d’une cellule photovoltaïque ». Mémoire Master université de Bejaia 2012.

[LAB07] : Anne Labouret, Michel Villoz, «Energie solaire photovoltaïque ».Livre 3éme édition DUNOD, 2007.

[LAL09] : Lalouni Sofia, « Etude commande et simulation d’une chaine hybride (photovoltaïque-éolienne). » de production d’énergie électrique, thèse de Doctorat en Science, université de Bejaia, 2009.

[LOU09] : A. Louadah « Modélisation et commande d’un système de pompage photovoltaïque » Mémoire Master, université de Bejaia 2009.

[MAK13] : S. Makhloufie : « Contribution à l’optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes». Thèse de doctorat en science université de Batna 2013.

[MEF12]: A. Meflah et T. Allaoui « Commande d’une chaine de pompage photovoltaïque au fil du soleil ». Revue des énergies renouvelables, vol 15 No 3 pp 489-499, 2012.

[MOU01] : A. Moussi et A. Saadi « Etude comparative entre les techniques d’optimisation des systèmes de pompages photovoltaïques ». Courrier du savoir pp 73-79, 2001.

[MOU01] : A. Moussi et A. Saadi « Etude comparative entre les techniques d’optimisation des systèmes de pompages photovoltaïques ». Courrier du savoir pp 73-79, 2001.

[OTH15]: H. Othmani, D. Mezghani et A. Mami « Etude d’un système photovoltaïque ». Revue des énergies renouvelables, vol 3 pp 111-115, 2015.

[REK04]: D. Rekioua, T. Rekioua et S. Alloune – « Switching Strategies in Direct Torque Control of Induction Machine: Modeling and simulation », International Conference Modelling and Simulation (MS’2004), Lyon, France, 4-7 Juillet 2004, pp. 313-321.

## Références et bibliographie

- [ROY98] : 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.
- [SAL17] : Melle SALI Sara, Melle OUAkli Aldjia. «Commande non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque», Mémoire Master, Université Abderrahmane MIRA de Bejaia2017.
- [SIT1]: <http://www.rescer.gc.ca/> site web du réseau canadien des énergies renouvelables
- [SIT2]: [http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine\\_électrique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_électrique)
- [SIT3]: <http://www.blackmersmartenergy.com/fr/comparativedata/centrifugal-pumpsvspositive-displacement-pumps.html>
- [SOC10] : SOCOMEC, Cahier technique photovoltaïque 2010.
- [TAK85]: I. Takahashi, T. Noguchi, "A new quick response and high efficiency control strategy of an induction motor," Conf. Rec. IEEE-AS Annual Meeting, pp.496-502, Oct. 1985.
- [TOU08] : Toufouti R., « Contribution à la commande directe du couple de la machine asynchrone », Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2008.
- [TOU15] : N. Touil et S. Ghenbasi « Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque ».Mémoire Master Université d'El Oued 2015.
- [WER09]: P. Werfel: « Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts », Edition Wiley & Sons, February 2009.
- [WIT00]:C. C. de Wit, "Modélisation contrôle vectoriel et DTC," Ed. Hermes, 2000, pp. 183–213.



**Annexe**

# Annexe

## Annexe:

- **Moteur asynchrone à cage et les régulateurs :**

Tension triphasé :	380V
Courant nominale :	3 A
Puissance (P) :	1.5 KW
Résistances statorique du moteur :	$R_s=0.63 \Omega$
Résistances rotorique du moteur :	$R_r= 0.4 \Omega$
Inductance cyclique statorique :	$L_s=0.09 \Omega$
Inductance cyclique rotorique :	$L_r=0.08 \Omega$
: Inductance cyclique mutuelle :	$M=0.41 \Omega$
Vitesse d'entraînement nominale	$n_n= 1500 \text{ tr/min}$

- **Algorithme sur Matlab 2011 :**

### Hacheur :

```
function y = CCMBBoost(U,L,C,RL,Ron,Resr)
```

```
% déclaration de paramètre
```

```
% paramètres : L,C,RL,Ron,Resr
```

```
% input = Vg, D, vC, iout, iL
```

```
% output = iC/C vL/L Vo Ig
```

```
Vg = U(1);
```

```
D = U(2);
```

```
iout = U(3);
```

```
vC = U(4);
```

```
iL = U(5);
```

```
dbar = 1-D;
```

```
% les équations
```

```
Vo = vC+ Resr*((iL*dbar)-iout);
```

```
Ig = iL;
```

# Annexe

$$iC = (iL * dbar) - iout;$$

$$vL = Vg - (Vo * dbar) - iL * ((Ron * D) + RL);$$

$$y = [iC / C \quad vL / L \quad Vo \quad Ig];$$

**Commande MPPT « P&O » :**

```
function D = IC(V,I,T)
```

```
persistent Vk1 Vk Ik1 Ik d n;
```

```
if isempty(Vk1)
```

```
    Vk1=0;
```

```
end
```

```
if isempty(Ik1)
```

```
    Ik1=0;
```

```
end
```

```
if isempty(Vk)
```

```
    Vk=0;
```

```
end
```

```
if isempty(Ik)
```

```
    Ik=0;
```

```
end
```

```
if isempty(d)
```

```
    d=0;
```

```
end
```

```
if isempty(n)
```

```
    n=0;
```

```
end
```

```
    if (T >= n+0.002)
```

```
        n = n + 0.002;
```

```
        Vk1=V;
```

```
        Ik1=I;
```

# Annexe

$dV=V_k-V_{k1}$ ;

$dI=I_k-I_{k1}$ ;

$V_k=V_{k1}$ ;

$I_k=I_{k1}$ ;

if ( $dV==0$ )

    if ( $dI==0$ )

$d=d+0$ ;

    else

        if ( $dI>0$ )

$dd=0.015$ ;

$d=d+dd$ ;

        else

$dd=0.015$ ;

$d=d-dd$ ;

        end

    end

else

    if( $dI/dV)+(I/V)<0.001$  && ( $dI/dV)+(I/V)>-0.001$ )

$dd=0$ ;

$d=d+dd$ ;

    else

        if ( $dI/dV)+(I/V)>0.005$ )

$dd=0.015$ ;

$d=d-dd$ ;

        else

$dd=0.015$ ;

$d=d+dd$ ;

    end

# Annexe

```
end
end
end
D=d;
if (d<0.01)
    d=0.01;
else
    if (d>0.99)
        d=0.99;
    end
end
end
end
```

- **Paramètres de la pompe centrifuge :**

**Cr** : 2.3 N.m

Vitesse spécifique :	$N_{sq} = 22.5 \text{ tr/mn}$
Debit nominal :	$Q_n = 2.6 \text{ l/s}$
Hauteur manométrique nominale :	$H_n = 15.1 \text{ m}$
Puissance absorbée nominale :	$P_{ab} = 625 \text{ W}$
Rendement nominal :	$\eta = 75 \%$
Nombre d'aubage :	$Z = 7$
Epaisseur de l'aube :	$S = 3 \text{ mm}$
Largeur d'entrée de l'aube :	$b_1 = 10 \text{ mm}$
Largeur de sortie de l'aube :	$b_2 = 10 \text{ mm}$
Angle d'entrée de l'aube :	$\beta_1 = 26^\circ$
Angle de sortie de l'aube :	$\beta_2 = 30^\circ$
Diamètre d'entrée de la roue :	$d_1 = 42 \text{ mm}$
Diamètre de sortie de la roue :	$d_2 = 82 \text{ mm}$

# Annexe