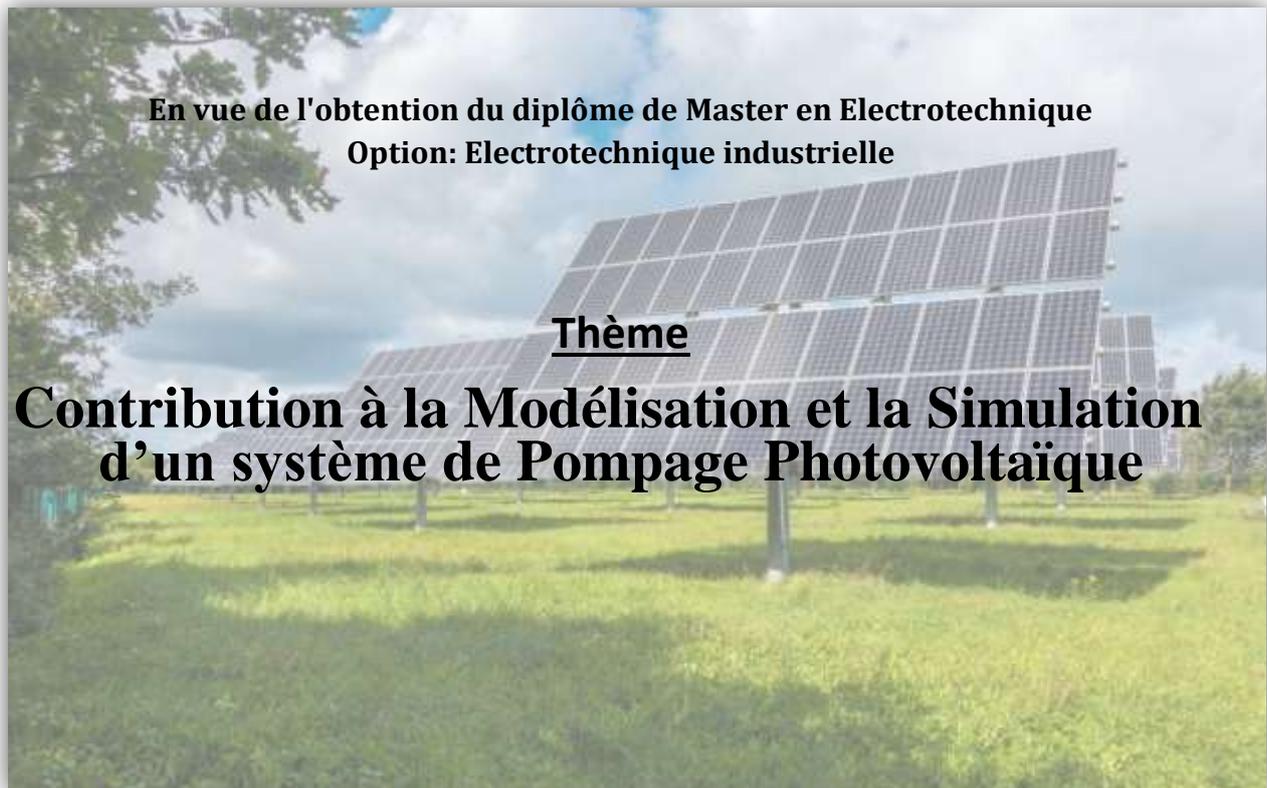


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE ABDE RAHMAN MIRADE BEJAÏA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



# Mémoire de fin de cycle



En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique  
Option: Electrotechnique industrielle

## Thème

**Contribution à la Modélisation et la Simulation  
d'un système de Pompage Photovoltaïque**

Réalisé par:

- ❖ Mr OUGHLIS Rahim
- ❖ Mr MOUHOUBI Sid Ahmed

Encadré par :

Mr BERBOUCHA Ali

Promotion Septembre 2021

# *Remerciement*

*Au terme de ce travail, nous tenons à remercier le bon Dieu de nous avoir donnés le courage, la volonté et la patience pour achever ce travail.*

*Nos remerciements les plus vifs et chaleureux vont à notre encadreur A.BERBOUCHA, pour son aide, sa disponibilité et son soutien.*

*Nous remercions profondément tous les enseignants du département de génie électriques qui nous ont donné de leurs savoir et nous ont soutenu tout au long de notre cursus.*

*Nous tenons aussi à remercier les membres de jury qui ont bien voulu nous faire l'honneur de juger notre travail.*

# Dédicace

*Au nom de Dieu le Miséricordieux, Et la prière soient sur Sa création, Muhammad paix soit sur lui.*

*Je dédie ce travail à mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé. Ils ont sacrifié tout pour nous leurs santés et leurs vie tout juste pour notre réussite que Dieu vous bénisse, vous apporte de santé et vous garde pour nous.*

*A ma grande mère et mes Oncles et Tantes*

*A mes sœurs Leïla, Sara*

*A mes frères Saber, Nabil*

*A ma nièce Mérieme*

*A mes cousins et cousines*

*A toutes les familles qui portent le nom OUGHLIS*

*A mes frères et amis : Yanis, Lamine, Sid  
Ahmed, Walid, Mounir, Norredine, Fawzi, Ferhat, Yessmine, kenza,  
Warda, Mouhande,*

*A tous mes camarades et amis (es) de la promo de génie électriques.  
Et à tout ceux que je cannaïs*

**RAHIM**

# *Dédicace*

*Au nom de Dieu le Miséricordieux, Et la prière soient sur Sa création, Muhammad paix soit sur lui.*

*Je dédie ce travail à mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé. Ils ont sacrifié tout pour nous leurs santés et leurs vie tout juste pour notre réussite que Dieu vous bénisse, vous apporte de santé et vous garde pour nous.*

*A mes très chère sœurs LYNDA et LYNA.*

*A mon petite frère AMIR.*

*A tous mes ami(es).*

*SID-AHMED*

# **Sommaire**

# Sommaire

---

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

## **Chapitre I: Généralités sur les systèmes de pompage photovoltaïque**

Introduction .....	3
I.1 Histoire de photovoltaïque.....	3
I.2 Rayonnement solaire .....	4
□ Le rayonnement direct : Les rayons du soleil atteignent le sol sans subir de la modification (sans diffusion par l'atmosphère). Les rayons restent parallèles entre eux. ....	4
I.3 Cellule photovoltaïque.....	4
I.3.1 Principe de fonctionnement .....	5
I.3.2 Technologies des cellules photovoltaïques .....	5
I.3.3 Le Module photovoltaïque .....	6
I.4 Avantages et Inconvénients de l'Énergie Photovoltaïque .....	7
I.4.1 Avantage du photovoltaïque .....	8
I.4.2 Inconvénients du photovoltaïque .....	8
I.5 Les systèmes de pompage photovoltaïque .....	8
I.5.1 Le pompage au fil du soleil.....	8
I.5.2 Le pompage avec stockage électrochimique (batteries) .....	9
I.6 Les convertisseurs statiques.....	9
I.6.1 Convertisseur <i>DC/DC</i> (Hacheur).....	10
I.6.1.1 Convertisseur Buck (hacheur série ou dévolteur) .....	10
I.6.1.2 Convertisseur Boost (Hacheur parallèle ou Survolteur) .....	11
I.6.1.3 Convertisseur Buck-Boost .....	12
I.6.2 Convertisseur <i>DC/AC</i> (Onduleur).....	14
I.7 Groupe moteur-pompe.....	14
I.7.1 Moteurs.....	14
I.7.1.1 Moteurs à courant continue.....	14
I.7.1.2 Moteur à courant alternatif.....	15
I.7.2 Les pompes.....	15
I.7.2.1 Type de pompe .....	16
I.8 Conclusion :.....	20

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

II. Introduction .....	21
II.1 Description du système à étudier .....	21
II.2 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque.....	21

## Sommaire

---

II.2.1	Modèle idéal .....	22
II.2.2	Modèle à une diode.....	23
II.2.3	Modèle à une diode sans résistance shunt .....	24
II.2.4	Modèle à deux diodes .....	24
II.2.5	Modèle à deux diodes sans résistance shunt .....	25
II.3	Caractéristique courant-tension, puissance-tension d'un module .....	25
II.3.1	Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque .....	27
II.3.2	Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque .....	28
II.4	Modélisation du convertisseur statique DC/DC (hacheur).....	28
II.4.1	Convertisseur dévolteur (Buck - converter) .....	29
II.4.2	Convertisseur survolteur (Boost - converter) .....	31
II.4.3	Le convertisseur Buck-Boost.....	33
II.5	Modélisation du groupe motopompe .....	34
II.5.1	Le Moteur .....	34
II.5.1.1	Le moteur à aimant permanent sans balais.....	35
II.5.1.2	Description d'un moteur brushless.....	35
II.5.1.3	Caractéristique du BLDC.....	35
II.5.1.4	Modèle mathématique d'un moteur brushless .....	36
II.5.2	Modélisation de la pompe :.....	36
II.6	Conclusion :.....	37

## Chapitre III : Simulation du système de pompage photovoltaïque

III.	Introduction .....	38
III.1	Commande et control des éléments du système.....	38
III.1.1	La commande du point de puissance maximale (MPPT) .....	38
III.1.1.1	La méthode Perturbation & Observation (P&O) .....	39
III.1.1.2	Test de la méthode Perturbation & Observation (P&O).....	42
III.1.2	Commande du moteur BLDC .....	46
III.2	Dimensionnement du système de pompage PV .....	49
III.2.1	Evaluation des besoins en eau.....	49
III.2.2	Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire .....	49
III.2.3	Dimensionnement de la pompe centrifuge.....	50
III.2.4	Dimensionnement du moteur.....	51
III.2.5	Dimensionnement du générateur PV .....	52

## Sommaire

---

III.3	Simulation du system global.....	52
III.4	Conclusion.....	55
<b>Conclusion générale.....</b>		<b>57</b>

# Liste des figures

## Liste des figures

---

### **Chapitre I:** Généralités sur les systèmes de pompage photovoltaïque

Figure I.1 Le rayonnement solaire.....	4
Figure I.2 : Le principe de la cellule photovoltaïque.....	5
Figure I.3 : Cellule monocristalline.....	5
Figure I.4. Cellule poly-cristalline.....	6
Figure I.5. Cellule amorphe.....	6
Figure I.6. Cellules identiques en série.....	6
Figure I.7. Cellules identiques en parallèle.....	7
Figure I.8. Pompage au fil du soleil.....	9
Figure I.9. Pompage photovoltaïque avec stockage d'énergie.....	9
Figure I.10. Convertisseur <i>DC-DC</i> .....	10
Figure I.11. Schéma d'un convertisseur Buck.....	11
Figure I.12. Schéma équivalent lorsque $K_1$ est fermé.....	11
Figure I.13. Schéma équivalent lorsque $K_1$ est ouvert.....	11
Figure I.14. Schéma d'un convertisseur Boost .....	11
Figure I.15. Schéma équivalent lorsque $S$ est fermé.....	12
Figure I.16. Schéma équivalent lorsque $S$ est ouvert.....	12
Figure I.17. Convertisseur Buck-Boost.....	13
Figure I.18. Convertisseur Buck-Boost avec interrupteur passant.....	13
Figure I.19. Convertisseur Buck-Boost avec interrupteur bloqué.....	13
Figure I.20. Moteur à courant continue.....	14
Figure I.21. Moteur à courant alternatif.....	15
Figure I.22. Caractéristique débit-vitesse.....	16

## Liste des figures

---

Figure I.23. Schéma de principe d'une pompe centrifuge.....	18
Figure I.24. Caractéristiques d'une pompe centrifuge.....	18
Figure I.25. Caractéristiques couple-vitesse d'une pompe centrifuge.....	19
<b>Chapitre II : Modélisation des éléments du système de pompage photovoltaïque</b>	
Figure II.1 : Système globale à étudier.....	21
Figure II.2 : schéma idéale d'une cellule photovoltaïque.....	22
Figure II.3 :Schéma équivalent d'une cellule solaire.....	23
Figure II.4 : Schéma équivalent à une diode sans résistance shunt.....	24
Figure II.5: Schéma équivalent à deux diodes.....	24
Figure II.6 : Schéma équivalent à deux diodes sans résistance shunt.....	26
Figure II.7 : Caractéristique courant-tension.....	26
Figure II.8 : Caractéristique puissance-tension.....	26
Figure II.9 : Influence de l'éclairement sur $I_{pv}(V_{pv})$ .....	27
Figure II.10 : Influence de l'éclairement sur $P_{pv}(V_{pv})$ .....	27
Figure II.11 : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ .....	28
Figure II.12 : Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ .....	28
Figure II.13 : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck.....	29
Figure II.14 : Périodes fermeture et ouverture d'un interrupteur.....	30
Figure II.15 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur (a) : K fermé, (b) : K ouvert.....	30
Figure II.16 : Schéma de principe d'un convertisseur Boost.....	31
Figure II.17 : Schémas équivalents du hacheur survolteur (a) : K fermé, (b) : K ouvert.....	32

## Liste des figures

---

Figure II.18. : Convertisseur dévolteur-survolteur.....	33
Figure II.19 : Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur (a): K ouvert, (b): K Fermé.....	33

### Chapitre III : Simulation du système de pompage photovoltaïque

Figure III.1. Schéma synoptique du système PV.....	38
Figure III.2. Caractéristique $P_{pv}$ ( $V_{pv}$ ) d'un panneau photovoltaïque.....	40
Figure III.3. Organigramme de la méthode perturbation et observation.....	41
Figure III.4. Variation de la température et l'enseillement en fonction du temps.....	42
Figure III.5. Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps....	42
Figure III.6. Variation de la température et l'enseillement en fonction du temps.....	43
Figure III.7. Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps....	43
Figure III.8. Variation de la température et l'enseillement en fonction du temps.....	43
Figure III.9. Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps....	44
Figure III.10. Variation de la température et l'enseillement en fonction du temps.....	44
Figure III.11. Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps...44	
Figure III.12. Variation de la température et l'enseillement en fonction du temps.....	45
Figure III.13. Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps....	45
Figure III.14. Variation de la température et l'enseillement en fonction du temps.....	45
Figure III.15. Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps...46	
Figure III.16. Ensemble moteur-commutateur.....	46
Figure III.17. Formes typiques des courants et des FEMs.....	47
Figure III.18. Signaux à effet hall.....	48

## Liste des figures

---

Figure III.19. Variation de l'ensoleillement et de la température.....	53
Figure III.20. Puissance optimale á la sortie des panneaux photovoltaïques.....	53
Figure III.21. Tension optimale á la sortie des panneaux photovoltaïques.....	53
Figure III.22. Courant optimal á la sortie des panneaux photovoltaïques.....	54
Figure III.23. Vitesse de rotation du groupe motopompe.....	54
Figure III.24. Débit d'eau pompé par la pompe.....	54
Figure III.25. Hauteur manométrique de pompage.....	55
Figure III.26. Volume pompé par le groupe motopompe.....	55

# Liste des Tableaux

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau II.1</b> :Caractéristique du panneau photovoltaïque utilisé.....	26
<b>Tableau III.1</b> :États de commutation pour les commutateurs électronique.....	48
<b>Tableau III.2</b> : Paramètres du BLDC utilisé.....	49

# **Nomenclature**

## Nomenclature

---

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

$C_s$  : Le couple statique, très petite.

$I_{ph}$  : Courant photovoltaïque

$I_d$  : Courant diode

$R_s$  : Resistancesérie

$I_0$  : Courant de saturation de la diode.

$I_d$  : Courant de la diode.

$q$  : Charge de l'électron qui est égale à  $1,60217646.10^{-19}$  C.

$K$  : Constante de Boltzmann qui est égale à  $1,3806503.10^{-23} J.K^{-1}$ .

$T$  : Température de la jonction PN (K).

$A$  : Constante d'idéalité de la diode. Plus elle est proche de 1 et plus la diode est idéale

Dc/Dc : convertisseur continue (hacheur)

$T_s$  : est la période de commutation.

$d$  : Le rapport cyclique du commutateur.

BLDC : Moteur Brushless

$\omega_r$  : La vitesse angulaire en rad/s

$C_e$  : Le couple électromagnétique développé en N/m

$C_r$  : est le couple de charge en N/m

$f$  : est le coefficient de frottement en  $N.(m/rad).s^{-1}$

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

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

## Nomenclature

---

$R_{mp}$  : Rendement du groupe motopompe (%)

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

$\rho$ : Masse volumique de l'eau (1000 Kg/m<sup>3</sup>)

$Q$ : Débit volumique (m<sup>3</sup>/s).

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

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

$K_r$ : Coefficient de proportionnalité [(Nm/ (rad.s-1)<sup>2</sup>].

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

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

# **Introduction générale**

### **Introduction générale :**

L'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre jusqu'à les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 KWh sur la majorité du territoire national, soit près de 1700KWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 kwh/m<sup>2</sup>/an au Sud du pays. [1]

L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non polluante, et son utilisation offre un approvisionnement en énergie inépuisable. Etant donné que l'approvisionnement en eau pour les besoins domestiques et d'irrigation reste le souci quotidien des habitants des zones enclavées et sahariennes, les systèmes de pompage photovoltaïque sont particulièrement bien adaptés pour l'alimentation en eau à partir des puits ou des forages. Le pompage photovoltaïque est l'une des applications de l'énergie solaire photovoltaïque dans les sites isolés. [1]

Cette technologie est en développement et caractérisée par un coût graduellement en baisse. La première génération des systèmes de pompage solaires utilisée des moteurs à courant continu à aimant permanent, surtout pour les applications à des basses et moyennes hauteurs. Ces dernières années, le moteur asynchrone est de plus en plus utilisé pour les applications de pompage solaire à cause de sa simplicité, sa robustesse et sa fiabilité (cout & rendement). La chaine de pompage étudiée dans notre cas, dotée d'une commande MPPT utilise un moteur asynchrone, entraînant une pompe centrifuge. [1]

Aujourd'hui, l'exploitation de l'énergie photovoltaïque offre un approvisionnement en énergie inépuisable mais surtout une énergie propre et non polluante, ce qui constitue un avantage certain. [2]

Depuis les premières installations à la fin des années 70, les systèmes de pompage photovoltaïque ont eu une grande part dans les projets d'application de l'énergie photovoltaïque et ils appartiennent de nos jours aux applications les plus significatives de l'énergie photovoltaïque. Ceci peut être principalement attribué au fait qu'il n'est pas économiquement faisable de relier de tels sites éloignés au réseau électrique. [3]

## Introduction générale

---

Dans ce contexte général, notre étude se porte sur contribution à la modélisation et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque. Nous avons structuré notre travail en trois chapitres.

Dans le premier chapitre nous présentons une approche générale sur l'énergie photovoltaïque ainsi que les différentes technologies d'une cellule photovoltaïque.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation du générateur photovoltaïque et les différents composants du système de pompage photovoltaïque.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons une méthode dimensionnement basés sur les besoins en eau, et la simulation et l'interprétation des résultats. Nous terminerons notre travail par un conclusion générale.

**Chapitre I :**  
Généralités sur les systèmes de  
pompage photovoltaïque

## I. Introduction

L'évolution de la vie a été possible grâce à la présence de l'eau. Cependant, bien qu'il existe en quantité abondante, seule une portion de cette eau est réellement disponible pour la consommation humaine ou animale. Les eaux salées des mers et des océans représentent près de 97% du volume total d'eau de notre planète, et une grande partie des 3% restants se trouve bloquée sous forme de neige, de glacier ou d'eau souterraine profonde.

Pour être ramenées en surface, les eaux souterraines ont besoin d'être pompées. Par conséquent, la nécessité d'une pompe et d'une source fiable d'énergie comme le photovoltaïque s'impose. Le pompage photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batteries. [4]

### I.1 Histoire de photovoltaïque

Le physicien Français **Edmond BECQUEREL** décrit le premier l'effet photovoltaïque en 1839 et **EINSTEIN** en expliqua les mécanismes en 1912, mais cela resta une curiosité scientifique de laboratoire jusque dans les années 50, **BECQUEREL** découvrit que certains matériaux délivrent une petite quantité d'électricité quand on les expose à la lumière. [5]

L'effet fut étudié dans les solides tels que le sélénium par **Heinrich HERTZ** dès les années 1870. Avec des rendements de l'ordre de 1%, le sélénium fut rapidement adopté par les photographes comme luxmètre. [5]

De rapides progrès furent obtenus dès les années 1950 par les équipes de Bell Laboratoires qui fabriquèrent la première cellule au silicium cristallin de rendement 4% à partir du procédé de tirage **CZOCHRALSKI**. L'industrie des semi-conducteurs contribua largement au développement des cellules solaires. [5]

La taille des cellules *PV* accompagna la progression de la dimension des wafers de l'industrie des circuits intégrés, de 5.08 cm dans le début des années 70, à 7.62 cm à la fin des années 70, et à 10.16 cm au début des années 80, avant de s'émanciper par la découverte de la croissance de lingots multi cristallins parallélépipédiques qui donnèrent des plaquettes carrées de 10 cm de côté et qui atteignent aujourd'hui couramment 12.5 à 15 cm de côté.

### I.2 Rayonnement solaire

Le soleil tire son énergie de réactions thermonucléaires se produisant dans son noyau. L'énergie émise par le soleil est sous forme d'ondes électromagnétiques dont l'ensemble forme le rayonnement solaire. En traversant l'atmosphère, le rayonnement va subir des transformations par absorption et par diffusion, on distingue pour cela [6] :

- **Le rayonnement direct :** Les rayons du soleil atteignent le sol sans subir de la modification (sans diffusion par l'atmosphère). Les rayons restent parallèles entre eux. [6]
- **Le rayonnement diffus :** En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire rencontre des obstacles tels que les nuages, la poussière, etc. Ces obstacles ont pour effet de repartir un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux dans toutes les directions. [6]
- **Le rayonnement réfléchi :** C'est le résultat de la réflexion des rayons lumineux sur une surface réfléchissante par exemple : la neige ; cette réflexion dépend de l'albédo (pouvoir réfléchissant) de la surface concernée. [6]

Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure suivante : [6]

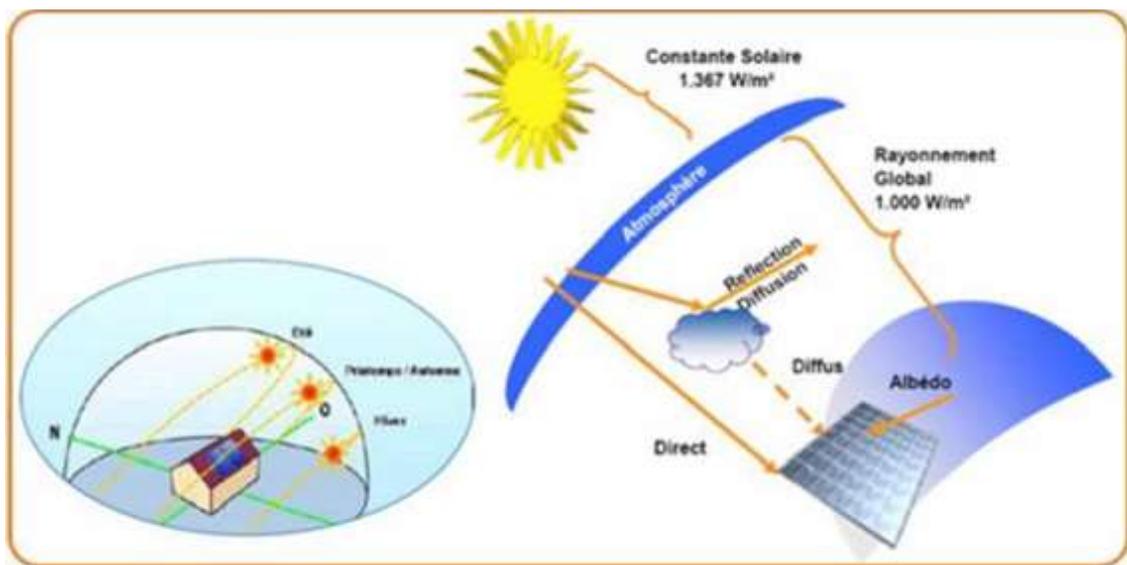


Figure I.1. Le rayonnement solaire [34]

### I.3 Cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs électroniques réalisées à l'aide des composants semi-conducteurs qui possèdent la particularité de produire l'électricité quand ils sont éclairés.

## I.3.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est de transformer des photons absorbés par un semi-conducteur en porteurs de charges (électrons et trous). Cette création de charges va entraîner la création d'une différence de potentiel aux bornes d'électrodes et d'un courant électrique dans un circuit connecté aux électrodes, comme nous montre la figure ci-dessous :

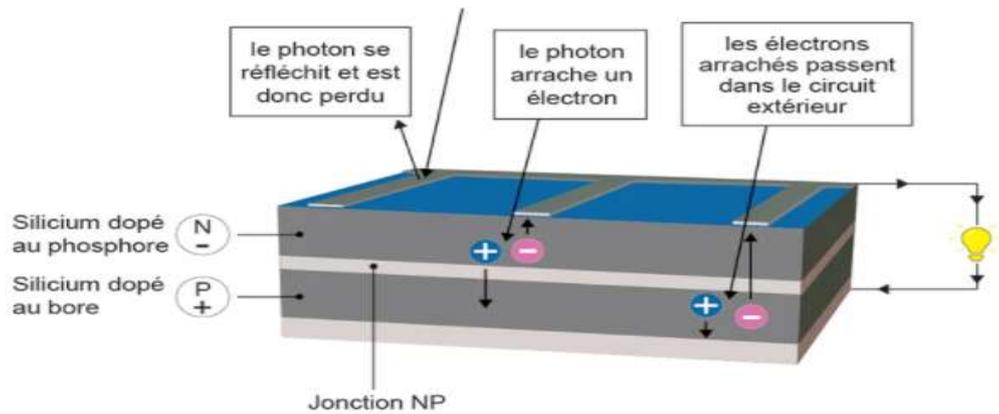


Figure I.2. Le principe de la cellule photovoltaïque [35]

## I.3.2 Technologies des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules photovoltaïques, et chaque type possède un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible : de 8 à 23 % de l'énergie qu'elles reçoivent.

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle et sont : [7]

➤ **Cellules monocristallines** : Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (13 à 17%) mais aussi le coût le plus élevé.

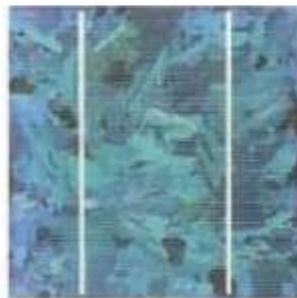


Figure I.3. Cellule monocristalline [7]

- **Cellules poly-cristallines :** Leurs coût de fabrication est moins important, vu leur conception facile. Cependant leur rendement est plus faible (11 à 15 %).

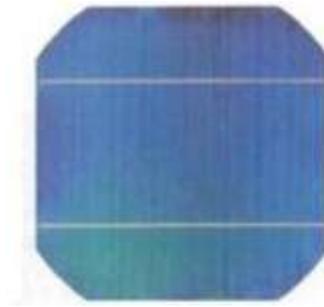


Figure I.4. Cellule poly-cristalline [7]

- **Cellules amorphes :** Elles ont un faible rendement (5 à 9 %), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.



Figure I.5. Cellule amorphe [7]

### I.3.3 Le Module photovoltaïque [8]

La puissance produite par une cellule photovoltaïque seule est très faible, elle ne peut pas faire fonctionner le matériel électrique usuel. Il est donc nécessaire d'associer plusieurs de ces cellules en série et en parallèle pour obtenir les caractéristiques électriques désirées.

Le module photovoltaïque est donc un ensemble de cellules connectées en série, en parallèle ou en série parallèle. 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.

- **Association série :** En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.

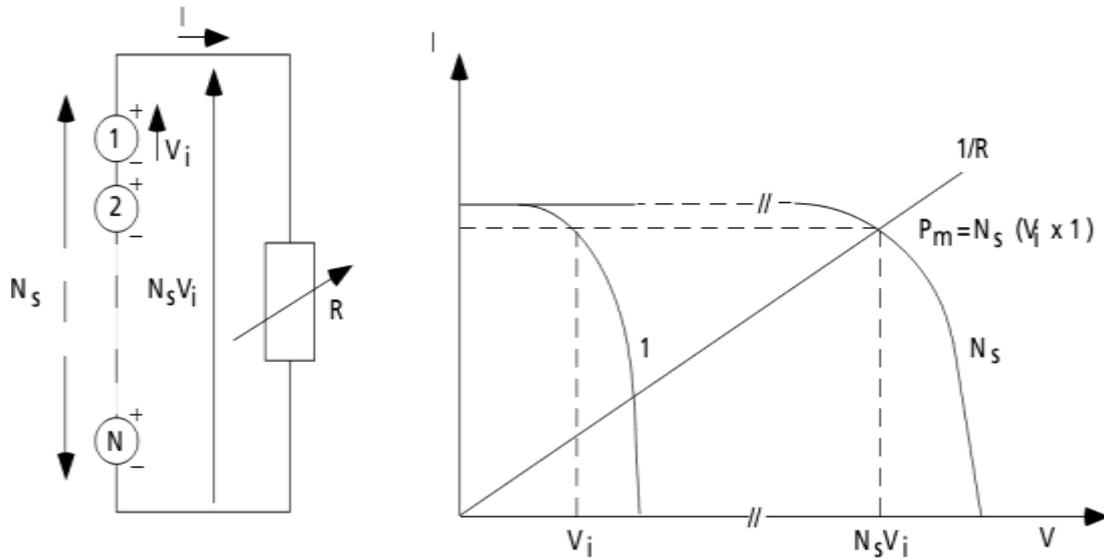


Figure I.6. Cellules identiques en série

- **Association parallèles :** En additionnant des cellules ou des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité du courant augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

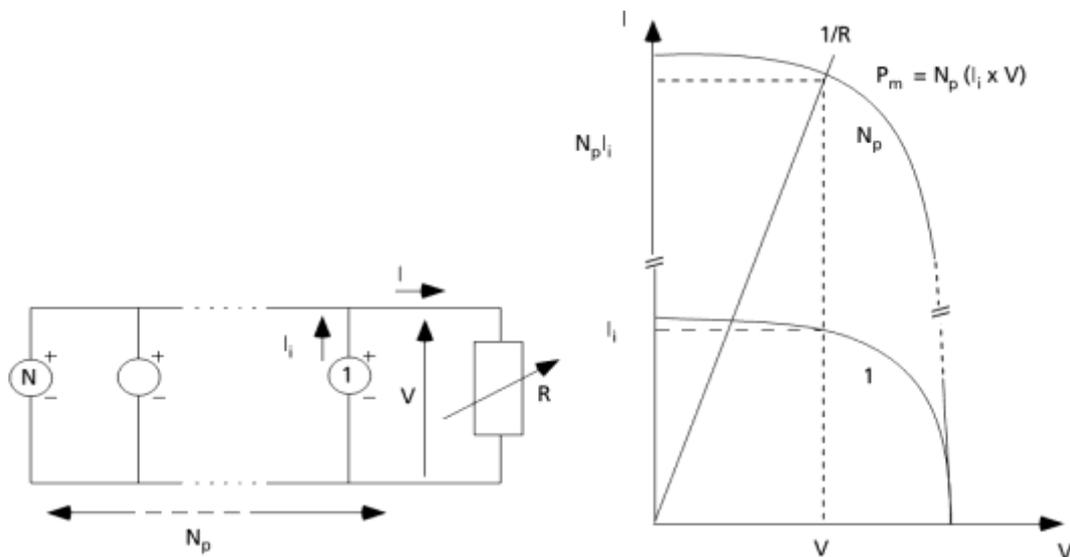


Figure I.7. Cellules identiques en parallèle

#### I.4 Avantages et Inconvénients de l'Énergie Photovoltaïque [8]

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients.

### I.4.1 Avantage du photovoltaïque

- Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, peu sujettes à l'usure, elles demandent peu d'entretien.
- Le montage des installations photovoltaïques est simple et les installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.

### I.4.2 Inconvénients du photovoltaïque

- Le rendement des panneaux photovoltaïques est encore faibles et de l'ordre de 23.4 %.
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an.

## I.5 Les systèmes de pompage photovoltaïque

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.5.1 Le pompage au fil du soleil [9]

Le pompage 'au fil du soleil' permet d'avoir un système photovoltaïque simple, fiable et moins couteux. Ici l'eau est pompée et stockée dans un réservoir, au fil de la journée. On parle alors d'un stockage hydraulique. L'eau stockée sera distribuée au besoin.

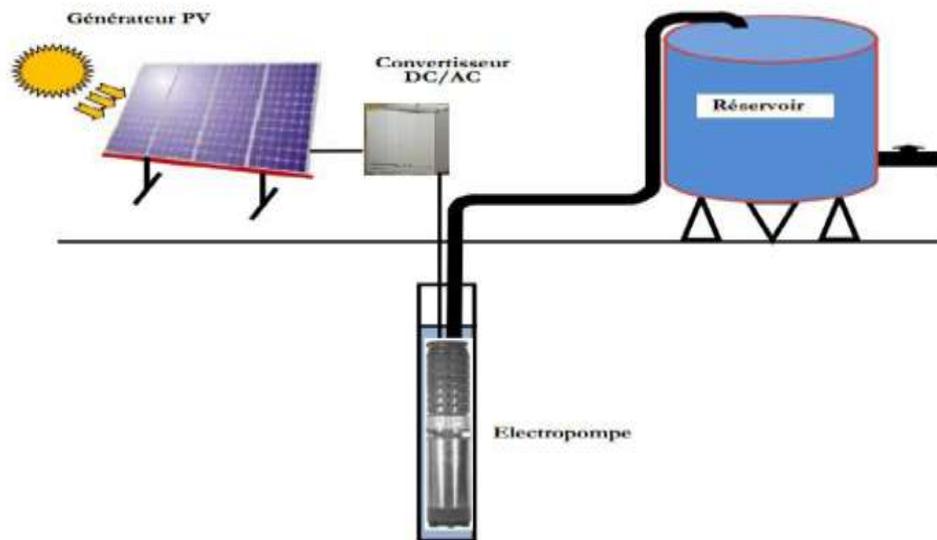


Figure I.8. Pompage au fil du soleil [9]

### I.5.2 Le pompage avec stockage électrochimique (batteries) [10]

Ici c'est l'énergie électrique qui sera stockée dans des batteries. Le pompage sera possible même en absence du soleil. Un tel système est plus coûteux que le précédent, vu la nécessité de changer les batteries, car elles ont une courte durée de vie.

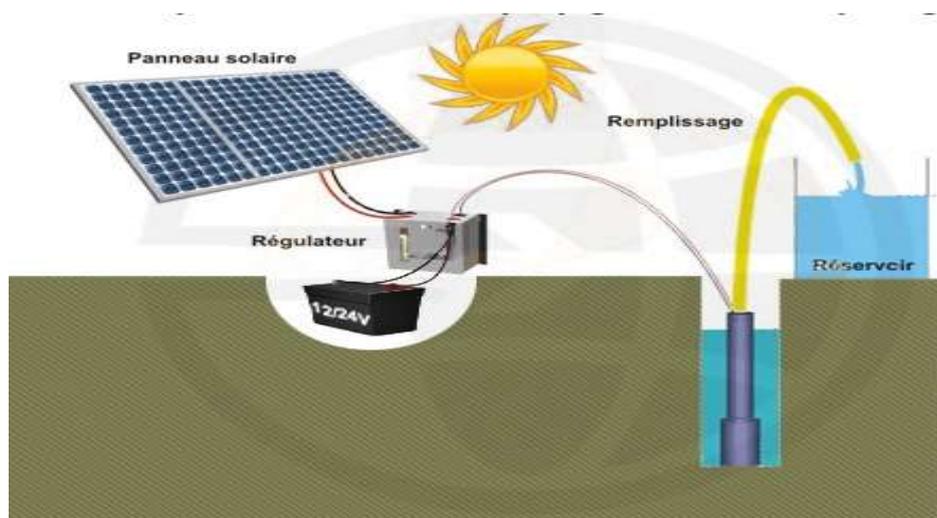


Figure I.9. Pompage photovoltaïque avec stockage d'énergie [10]

### I.6 Les convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné en la convertissant. Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement et avec

l'apparition des semi-conducteurs, de l'électronique de puissance, des diodes, des transistors et des thyristors etc... Les systèmes de conversion deviennent de plus en plus élaborés et ne nécessitent plus de machines tournantes.

### I.6.1 Convertisseur DC/DC (Hacheur)

Un hacheur est un convertisseur statique continu – continu. On convertit une tension continue fixe  $U$  (en provenance d'une alimentation) en une tension continue réglable  $V$  par un signal de commande  $U_{com}$  de rapport cyclique variable.

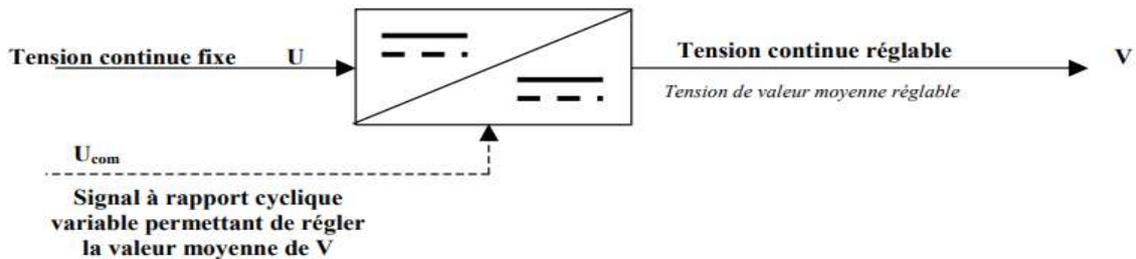


Figure I.10. Convertisseur DC-DC

#### I.6.1.1 Convertisseur Buck (hacheur série ou dévolteur) [11]

Un convertisseur *Buck*, ou hacheur série convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

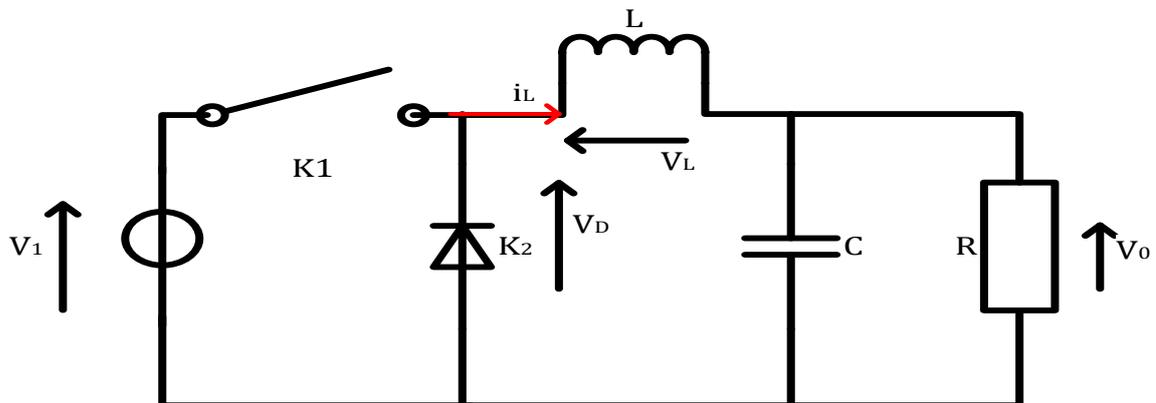


Figure I.11. Schéma d'un convertisseur Buck

#### Fonctionnement :

L'interrupteur  $K_1$  est fermé pendant la fraction  $T$  de la période de hachage. La source d'entrée fournit l'énergie à la charge  $R$  à travers l'inductance  $L$ .

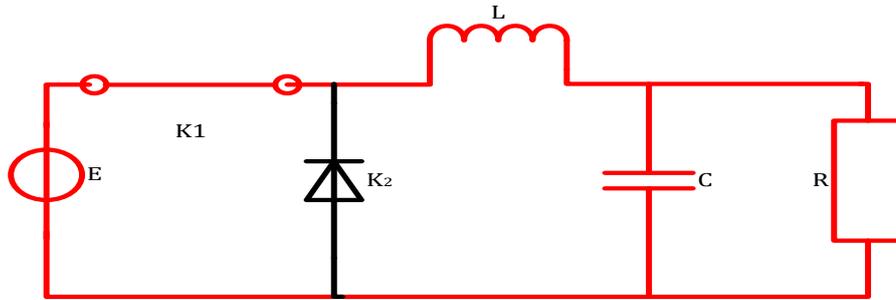


Figure I.12. Schéma équivalent lorsque  $K_1$  est fermé

Lors du blocage du transistor, la diode ( $K_2$ ) assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge.

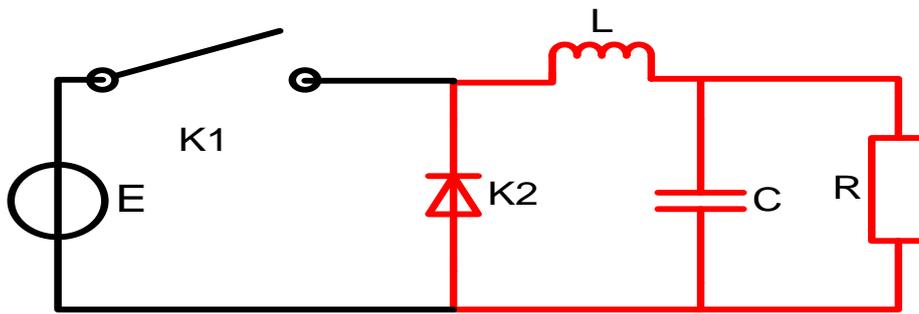


Figure I.13. Schéma équivalent lorsque  $K_1$  est ouvert

### I.6.1.2 Convertisseur Boost (Hacheur parallèle ou Survolteur)

Un convertisseur *Boost*, ou hacheur parallèle, convertit une tension continue en une autre tension continue de plus grande valeur. Son schéma est donné sur la (figure I.14).

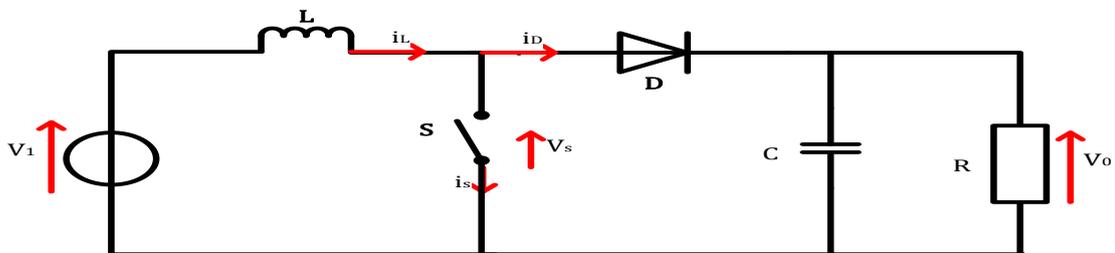


Figure I.14. Schéma d'un convertisseur Boost

#### Fonctionnement :

Le principe de fonctionnement de ce type de hacheur peut être expliqué de la manière suivante :

Quand l'interrupteur est fermé, le circuit est séparé en deux parties : à gauche, la source charge l'inductance, pendant ce temps, la capacité à droite maintient la tension de sortie utilisant l'énergie précédemment stockée.

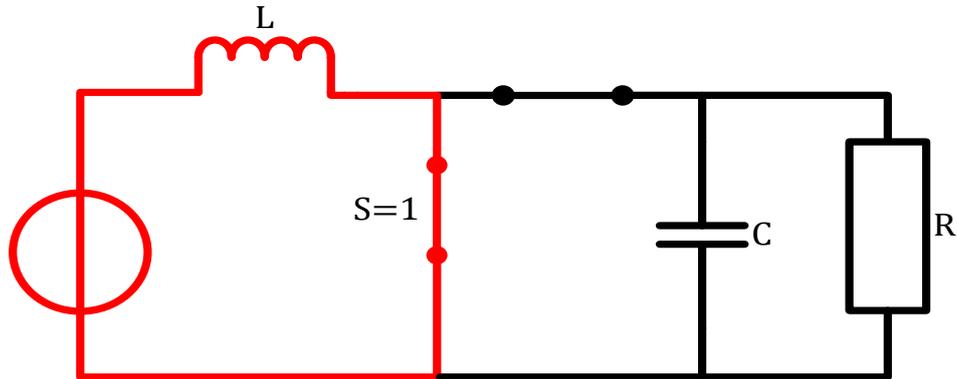


Figure I.15. Schéma équivalent lorsque  $S$  est fermé

Quand l'interrupteur est ouvert, la source  $DC$  et l'énergie stockée dans l'inductance vont ensemble alimenter le circuit à droite, d'où une augmentation de la tension de sortie.

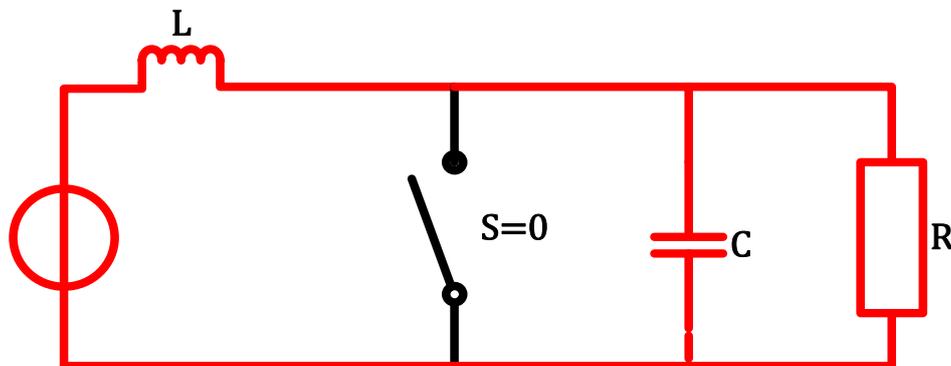


Figure I.16. Schéma équivalent lorsque  $S$  est ouvert

### I.6.1.3 Convertisseur Buck-Boost

Un convertisseur *Buck-Boost* est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse. Un inconvénient de ce convertisseur est que son interrupteur ne possède pas de limite reliée au zéro, compliquant ainsi sa commande.

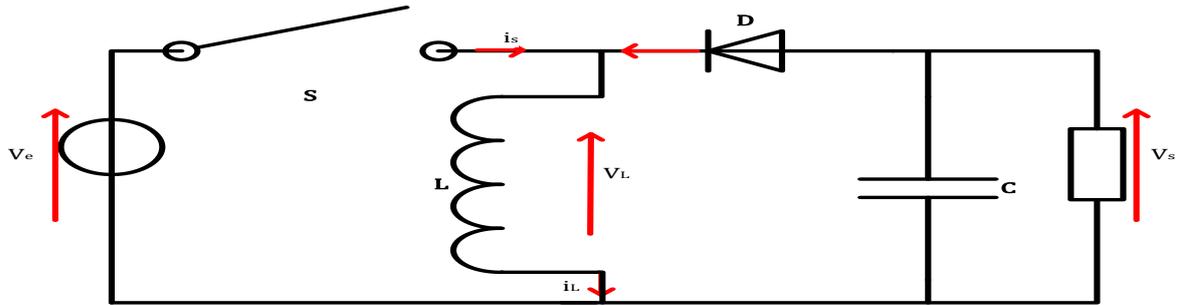


Figure I.17. Convertisseur Buck-Boost

### Fonctionnement :

Le fonctionnement d'un convertisseur *Buck-Boost* peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur  $S$  :

- Dans l'état passant, l'interrupteur  $S$  est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance.

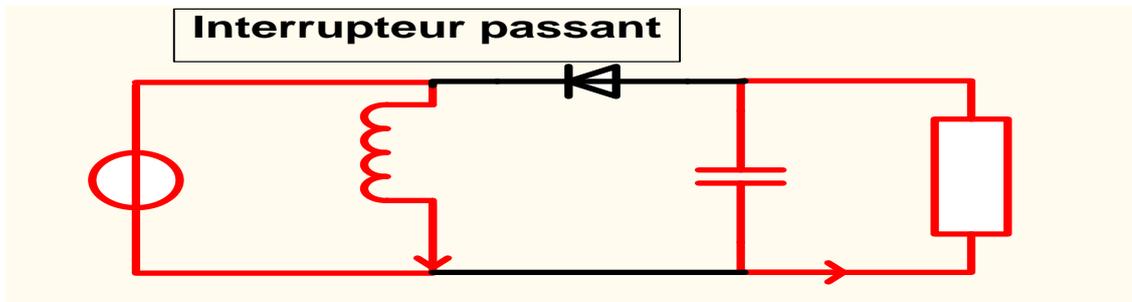


Figure I.18. Convertisseur Buck-Boost avec interrupteur passant

- Dans l'état bloqué, l'interrupteur  $S$  est ouvert. L'inductance est reliée à la charge ainsi qu'à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge.

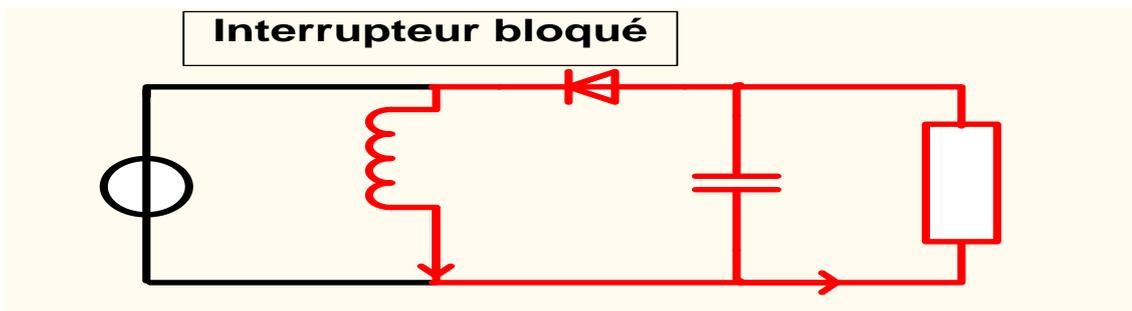


Figure I.19. Convertisseur Buck-Boost avec interrupteur bloqué

### I.6.2 Convertisseur DC/AC (Onduleur)

Les onduleurs sont des circuits statiques qui transforment une tension électrique sous forme continue en une tension sous forme alternative, à une valeur désirée de tension et de fréquence. La tension de sortie d'un onduleur a une forme d'onde périodique qui n'est pas sinusoïdale, mais qui peut être très proche de la forme d'onde souhaitée. [12]

## I.7 Groupe moteur-pompe

### I.7.1 Moteurs

Un moteur électrique est un dispositif électromécanique permettant la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique. Il existe deux types de moteurs : moteur à courant continu et moteur à courant 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. [13]

#### I.7.1.1 Moteur à courant continu

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

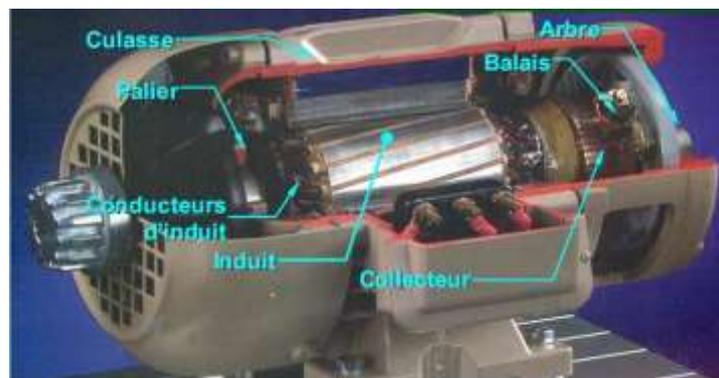


Figure I.20. Moteur à courant continue [36]

### I.7.1.2 Moteur à courant alternatif

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

Ces moteurs alternatifs se déclinent en deux types :

- Les moteurs synchrones.
- Les moteurs asynchrones.

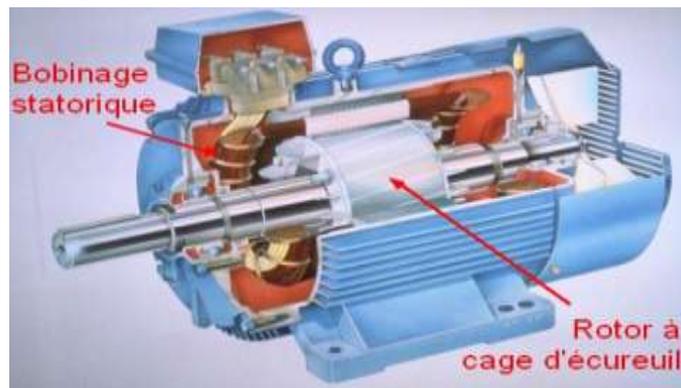


Figure I.21. Moteur à courant alternatif [37]

### I.7.2 Les pompes

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

Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. Alors que cette première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules, la pompe sans batterie, plus communément appelée 'pompe au fil du soleil', utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son Utilisation.[15]

Les critères qui guident le choix d'une pompe sont les suivants : [14]

- La nature du liquide pompé, viscosité, température, présence de corps solides.
- Le débit et la pression souhaités.
- L'énergie consommée.

### I.7.2.1 Type de pompe

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. On distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée : la pompe à aspiration et la pompe à refoulement. La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9,8 mètres (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres.[3]

#### A. La pompe volumétrique [15]

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

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

#### ➤ Caractéristiques d'une pompe volumétrique :

##### ✓ Caractéristiques débit- vitesse :

Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur. Mais son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale (*HMT*) et il est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur. [14]

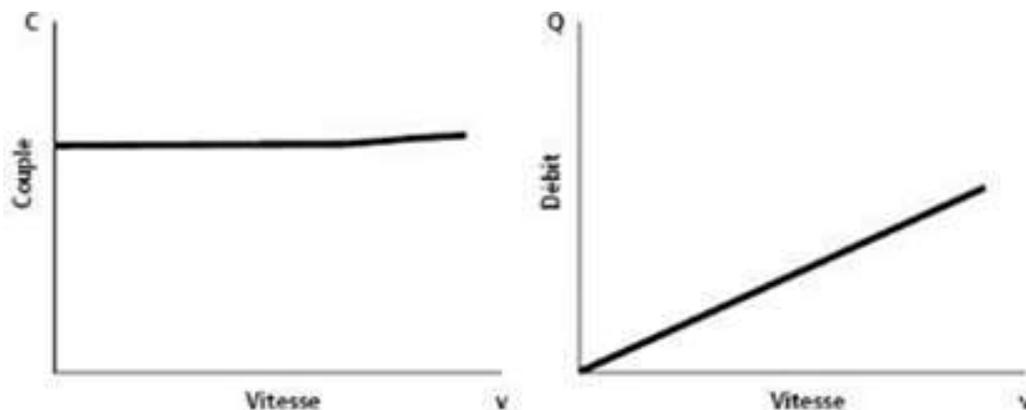


Figure I.22. Caractéristique débit-vitesse

### ✓ **Caractéristique puissance- vitesse :**

La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau. On les utilise parfois comme pompes de surface lorsque le couple est lent et irrégulier et que le débit demandé est faible, par exemple pour les pompes à main et les pompes éoliennes multiples. [16]

### **B. La Pompe centrifuge**

Les principes des pompes centrifuges sont la technologie la plus utilisée dans les systèmes de pompage photovoltaïques. Les pompes centrifuges sont conçues pour une tête fixe et leur rendement en eau augmente avec la vitesse de rotation. Les pompes centrifuges sont simples, à prix réduit et sont disponibles pour une large gamme de débit.[17].

Les pompes centrifuges utilisent les variations de vitesse du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie mécanique du moteur est transmise au fluide. La vitesse donnée au fluide va fournir une énergie cinétique à celui-ci. L'énergie cinétique est ensuite transformée en énergie de pression.

#### ➤ **Principe de fonctionnement :**

On peut décomposer le fonctionnement en deux étapes :

#### ✓ **L'aspiration :**

Le liquide est aspiré au centre du rotor par une ouverture appelée distributeur dont le rôle est de conduire le fluide depuis la conduite d'aspiration jusqu'à la section d'entrée du rotor. La pompe étant amorcée, c'est-à-dire pleine de liquide, la vitesse du fluide qui entre dans la roue augmente et par conséquent la pression dans l'ouïe diminue et engendre ainsi une aspiration et maintient l'amorçage.

#### ✓ **L'accélération :**

Le rotor transforme l'énergie mécanique appliquée à l'arbre de la machine en énergie cinétique. A la sortie du rotor, le fluide se trouve projeté dans la volute dont le but est de collecter le fluide et de le ramener dans la section de sortie. La section offerte au liquide étant de plus en plus grande, son énergie cinétique se transforme en énergie de pression.

#### ➤ **Constitution de la pompe centrifuge :**

Les pompes centrifuges sont essentiellement constituées d'une pièce en rotation le rotor appelée aussi roue ou hélice qui tourne dans un carter appelée corps de pompe ou volute. Ces machines comprennent donc :

- un distributeur (arrivée du liquide).
- l'ouïe d'aspiration.
- le corps de la pompe ou volute.
- le refoulement qui va s'élargir.
- l'ouïe de refoulement.

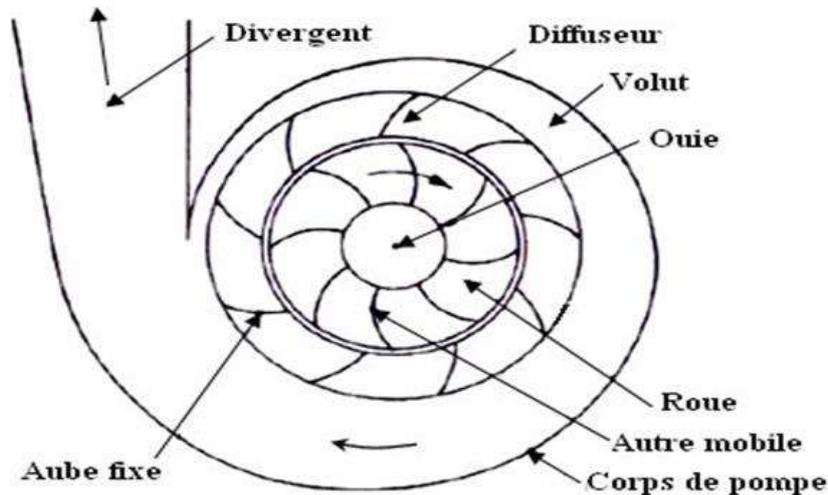


Figure I.23. Schéma de principe d'une pompe centrifuge

- **Caractéristiques d'une pompe centrifuge :**
- ✓ **Caractéristique Débit –vitesse :**

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique (*HMT*) relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est en fonction du carré de la vitesse du moteur. On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres). [18]

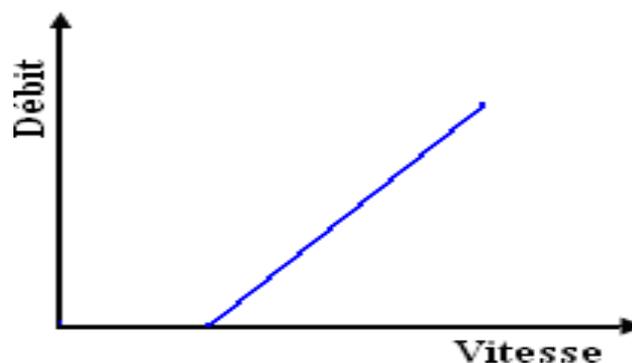


Figure I.24. Caractéristiques d'une pompe centrifuge

### ✓ Caractéristiques couple – vitesse :

Le couple du moteur augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est en fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit. Parce que le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle (qui est plus important qu'en rotation), la pompe requiert une vitesse minimale à une *HM* donnée pour obtenir un débit de départ non nul. [16]

Donc la pompe centrifuge oppose un couple résistant  $C_r$  qui est donné par :

$$C_r = K_r \cdot \omega^2 \quad (I.1)$$

Avec :

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

$C_s$  : Le couple statique, très petite.

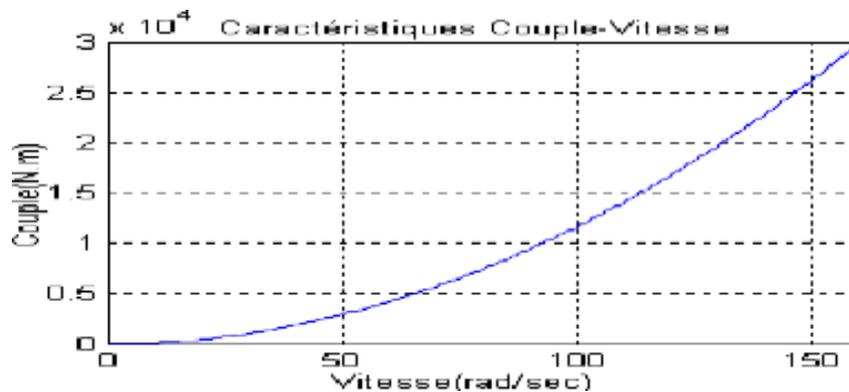


Figure I.25. Caractéristiques couple-vitesse d'une pompe centrifuge.

L'équation de la puissance mécanique de la pompe est aussi déterminée en fonction de la vitesse, elle est donnée par la relation suivante :

$$P_{méc} = C_r \cdot \omega \quad (I.2)$$

### **I.8 Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque et ses caractéristiques, ainsi que les différentes technologies d'une cellule PV.

Dans la seconde partie de ce chapitre nous avons cité quelques avantages et inconvénients et les deux types de systèmes photovoltaïques existants, ensuite on terminé par une exposition de quelques topologies de base des alimentations à découpages qui ne sont rien d'autre que des convertisseurs continu/continu, et les différents types de moteurs et pompes.

## **Chapitre II:**

# Modélisation des éléments du système de pompage photovoltaïque

### II. Introduction

Généralement, un système de pompage photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque, un hacheur, et un groupe motopompe. Le système de pompage photovoltaïque étudié fonctionne au fil du soleil.

Dans ce chapitre la modélisation de chaque composant sera présentée.

#### II.1 Description du système à étudier

Notre système est composé, comme le montre la Figure II.1 :

- **Les panneaux photovoltaïques** : permettent l'alimentation de la charge (motopompe).
- **La commande MPPT** : permet d'extraire la puissance maximale produite par les panneaux PV.
- **Le convertisseur DC/DC** : fournit une tension continue réglable à partir d'une tension continue d'alimentation.
- **Groupe motopompe** : convertit l'énergie électrique en énergie hydraulique, composé d'un moteur BLDC et d'une pompe centrifuge.

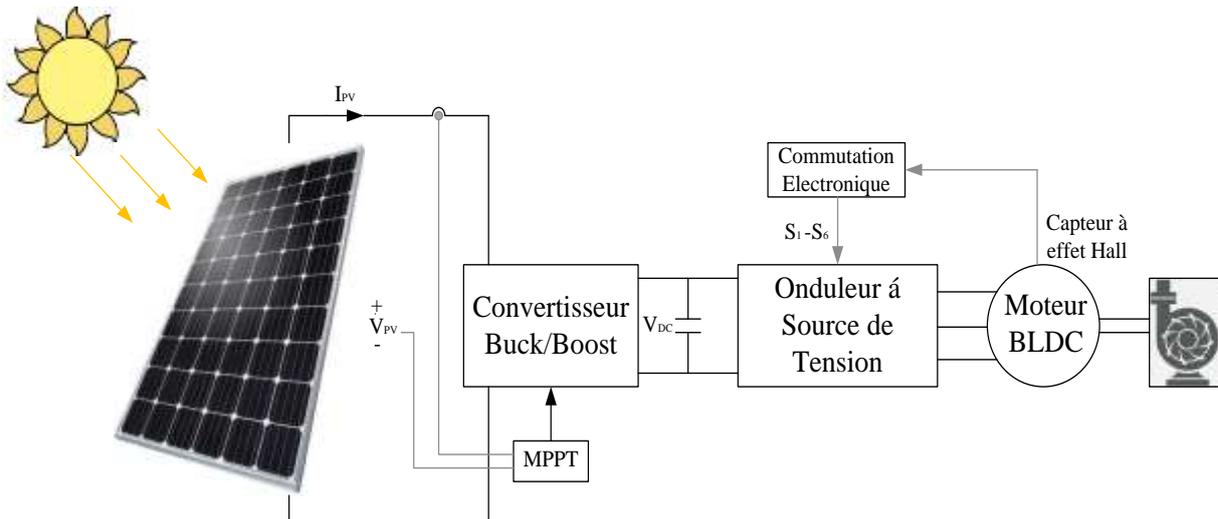


Figure II.1. Système globale à étudier

#### II.2 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles de la cellule photovoltaïque qui diffèrent entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et de l'intensité de courant de sortie.

### II.2.1 Modèle idéal

Un panneau photovoltaïque peut être décrit de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à l'éclairement incident, en parallèle avec une diode (Figure II.2) qui correspond à la jonction [19].

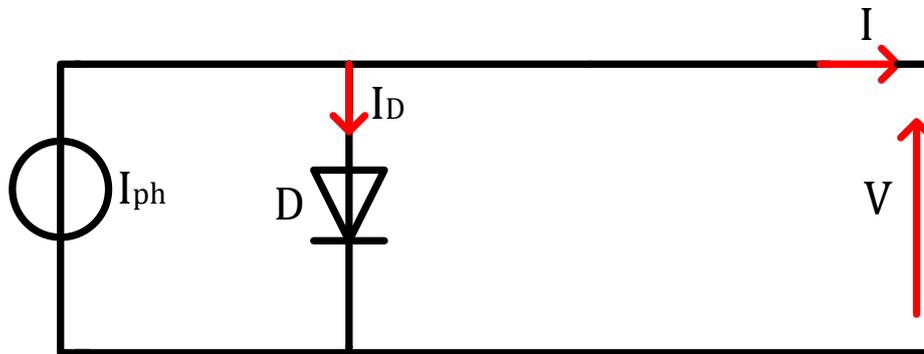


Figure II.2. Schéma idéal d'une cellule photovoltaïque

D'après la loi des nœuds, on obtient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.1})$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique  $I$ - $V$  est donnée par la relation :

$$I_d = I_0 \left[ e^{\frac{q*V}{A*K*T}} - 1 \right] \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$I_0$  : Courant de saturation de la diode.

$Q$  : Charge de l'électron qui est égale à  $1,60217646.10^{-19} \text{ C}$ .

$K$  : Constante de Boltzmann qui est égale à  $1,3806503.10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ .

$T$  : Température de la jonction  $PN$  (K).

$A$  : Constante d'idéalité de la diode. Plus elle est proche de 1 et plus la diode est idéale.

II.2.2 Modèle à une diode

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de Courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes Physique de polarisation et deux résistances (série et shunt).

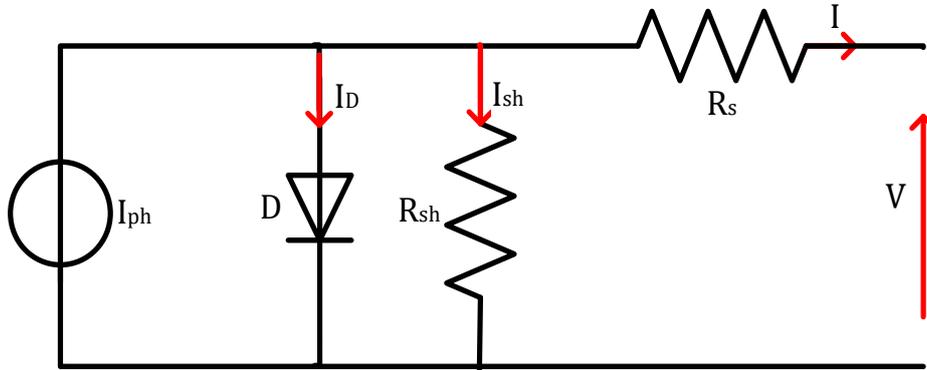


Figure II.3. Schéma équivalent d'une cellule solaire

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique  $I$ - $V$  de la photopile :

- La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle principalement la résistance du semi-conducteur utilisé.
- 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.

Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_0 \times \left[ e^{\frac{q*(V+R_s*I)}{A*K*T}} - 1 \right] \quad (II.3)$$

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

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (II.4)$$

Donc :

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left[ e^{\frac{q*(v+R_s*I)}{A*K*T}} - 1 \right] - \left[ \frac{V+R_s*I}{R_{sh}} \right] \quad (II.5)$$

### II.2.3 Modèle à une diode sans résistance shunt

Un modèle électrique empirique simple, il est actuellement le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, c'est le modèle à une Diode. La Figure II.4 illustre le circuit électrique équivalent du modèle à une diode.

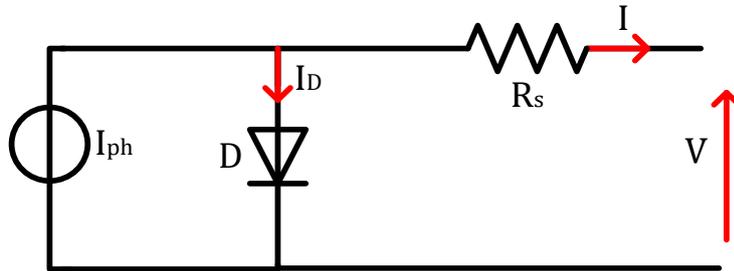


Figure II.4. Schéma équivalent à une diode sans résistance shunt

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

$$I = I_{ph} - I_D \quad (\text{II.6})$$

$$I_D = I_0 \times \left[ e^{\frac{q*(V+R_s*I)}{A*K*T}} - 1 \right] \quad (\text{II.7})$$

### II.2.4 Modèle à deux diodes

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique illustré par la Figure II.5, il se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série.

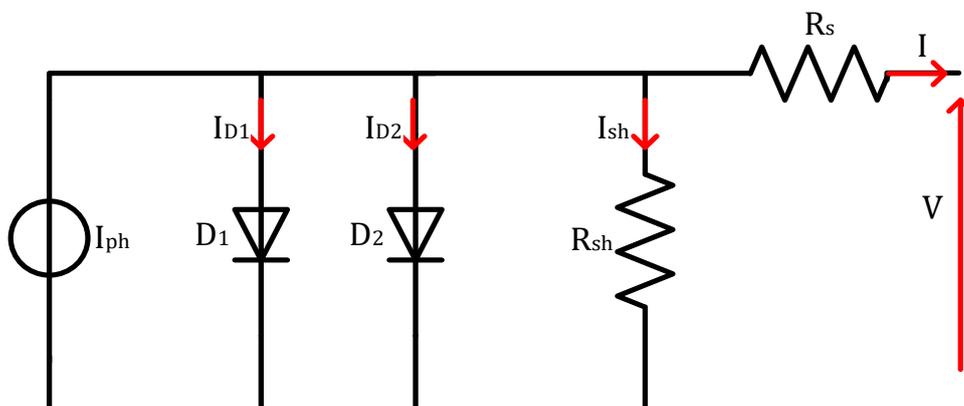


Figure II.5. Schéma équivalent à deux diodes

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

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) - I_{sh} \quad (\text{II.8})$$

$$I_{D1} = I_1 \times \left[ e^{\frac{q*(v+R_S*I)}{A*K*T}} - 1 \right] \quad (\text{II.9})$$

$$I_{D2} = I_2 \times \left[ e^{\frac{q*(v+R_S*I)}{A*K*T}} - 1 \right] \quad (\text{II.10})$$

Avec :  $I_1$  et  $I_2$  courant de saturation des diodes.

Au final on obtient :

$$I = I_{PH} - I_1 \times \left[ e^{\frac{q*(v+R_S*I)}{A*K*T}} - 1 \right] - I_2 \times \left[ e^{\frac{q*(v+R_S*I)}{A*K*T}} - 1 \right] - \left( \frac{V+R_S*I}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.11})$$

### II.2.5 Modèle à deux diodes sans résistance shunt

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique illustré par la Figure II.6, il se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux (éclairage), deux diodes pour la Polarisation de la cellule et une résistance série.

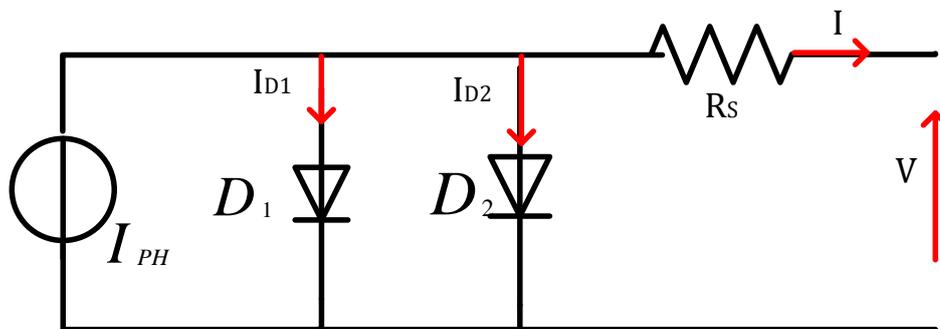


Figure II.6. Schéma équivalent à deux diodes sans résistance shunt

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

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) \quad (\text{II.12})$$

$$I = I_{ph} - I_1 \times \left[ e^{\frac{q*(v+R_S*I)}{A*K*T}} - 1 \right] - I_2 \times \left[ e^{\frac{q*(v+R_S*I)}{A*K*T}} - 1 \right] \quad (\text{II.13})$$

### II.3 Caractéristique courant-tension, puissance-tension d'un module

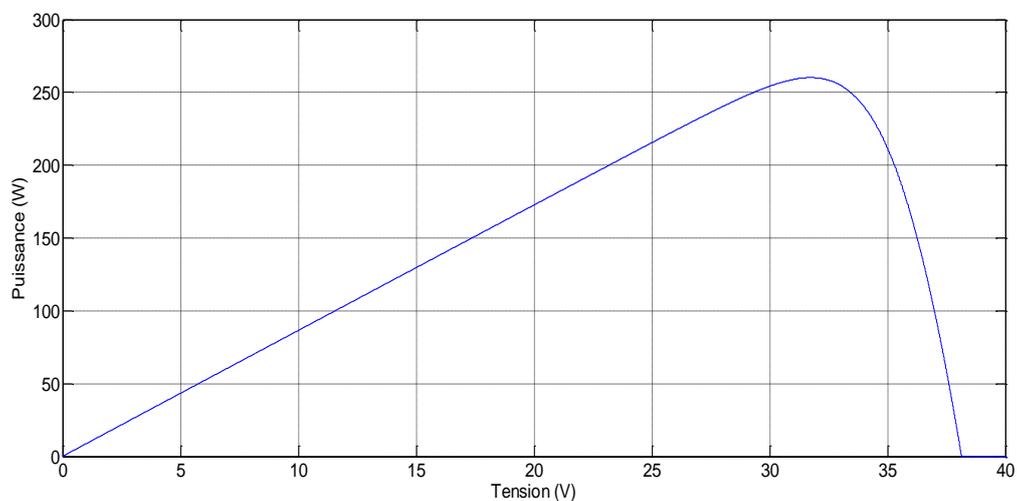
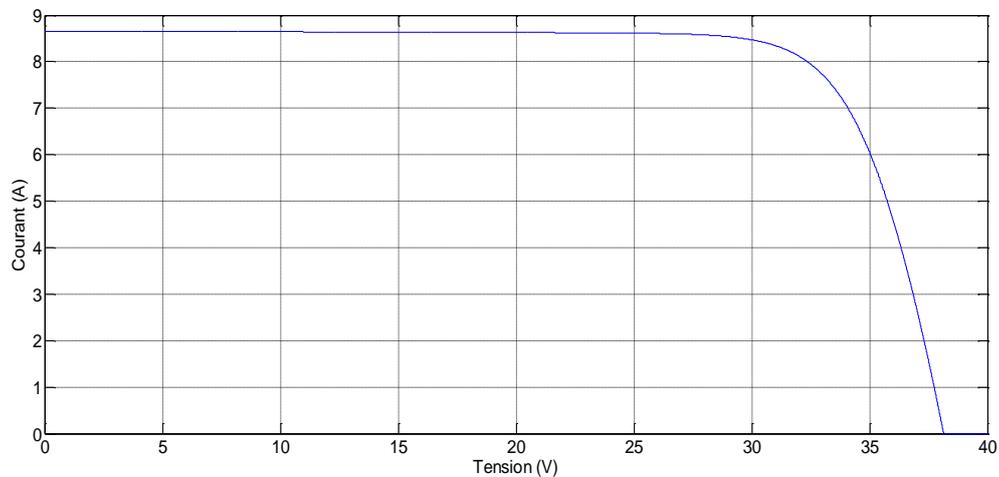
Les Figures II.7 et II.8 représentent respectivement les courbes  $I = f(V)$  et  $P = f(V)$  d'un module photovoltaïque, dont les caractéristiques sont données dans le Tableau II.1, dans des conditions standard d'irradiation et de température.

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

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques a une intensité rayonnante de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25\text{C}^\circ$ .

Puissance nominale max	260 W
Tension du circuit ouvert	38.15 V
Courant de court-circuit	8.66 A
Tension á puissance maximale	31.75 V
Courant á puissance maximale	8.19 A
Nombre de cellules en série	60
Coefficient de température de la tension de circuit ouvert	-0.32 %/°C
Coefficient de température du courant de court-circuit	0.05 %/°C

Tableau II.1. Caractéristique du panneau photovoltaïque utilisé [20]



II.3.1 Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque

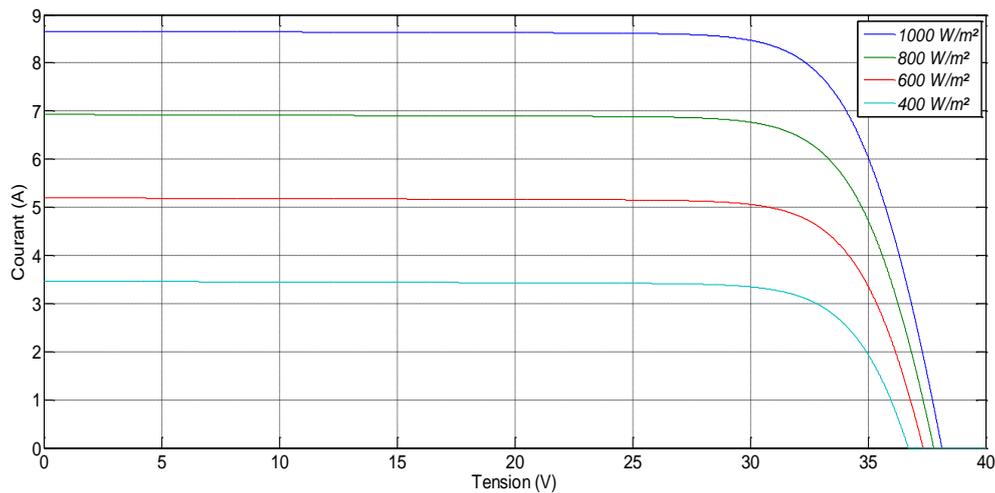


Figure II.9. Influence de l'éclairement sur  $I_{pv}(V_{pv})$

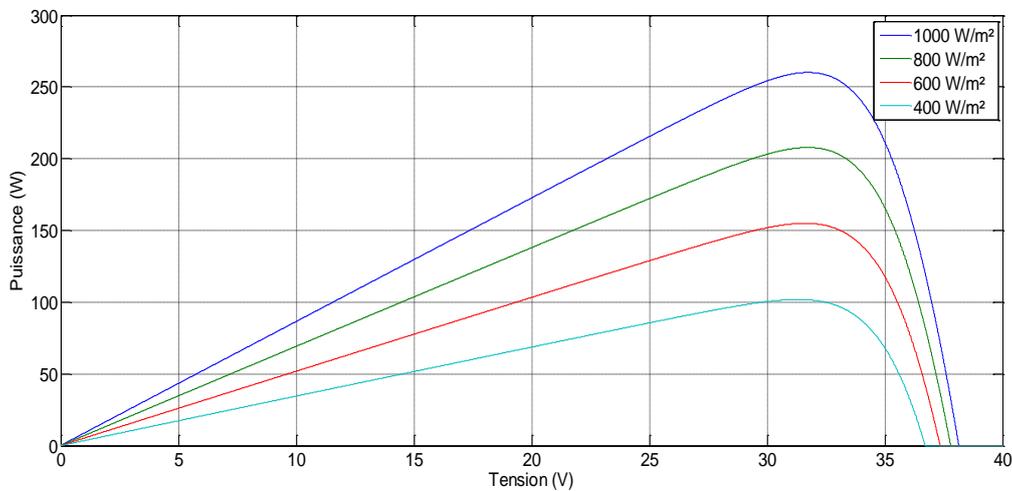


Figure II.10. Influence de l'éclairement sur  $P_{pv}(V_{pv})$

Les caractéristiques des Figures II.9 et II.10 montrent la variation du courant du module photovoltaïque ainsi que de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairement. On peut voir aussi sur le graphe, l'existence de maximum sur les courbes de puissance. Ces points correspondent aux points de puissances maximales lorsque l'irradiation varie pour une température donnée. On peut voir que le courant de court-circuit  $I_{sc}$  varie proportionnellement à l'irradiation. De même, la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  (à vide) varie très peu.

### II.3.2 Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque

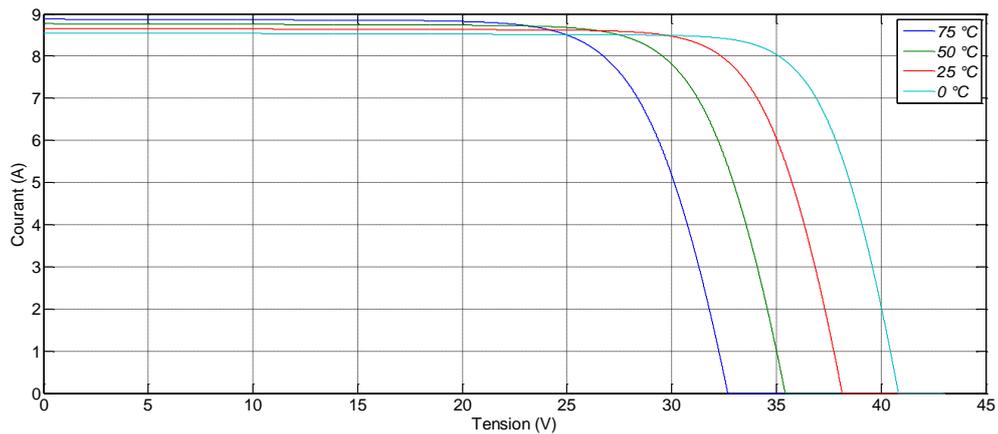


Figure II.11. Influence de la température sur la caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$

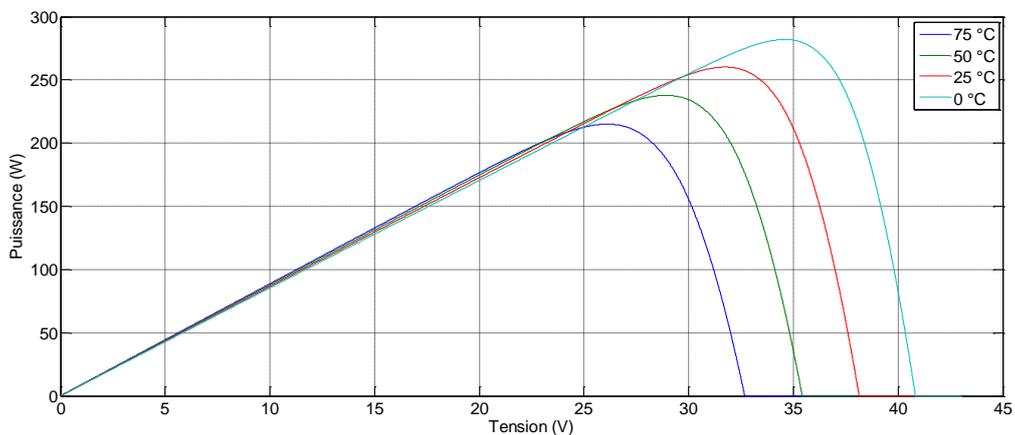


Figure II.12. Influence de la température sur la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$

Suivant les Figures II.11 et II.12, on constate que lorsque la température croît à irradiation constante la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  décroît fortement et le courant de court circuit  $I_{sc}$  augmente légèrement.

### II.4 Modélisation du convertisseur statique DC/DC (hacheur)

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement des convertisseurs soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance. Pour cette raison la conversion de puissance doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductances et condensateurs) et les commutateurs.

Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de puissance à convertir ou à commander, les *MOSFETs* (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) sont habituellement utilisés pour les puissances relativement basses (quelques *kW*) et les *IGBTs*

(Insulated Gate Bipolar Transistor) à des puissances plus élevées, les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance [21].

Trois topologies de base de circuit de conversion ( $DC/DC$ ) seront décrites dans la suite de ce chapitre ; nous présentons le principe des trois types de convertisseurs  $DC/DC$  (*Buck*, *Boost* et *Buck-Boost*), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (inductances et condensateurs) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement [14].

### II.4.1 Convertisseur dévolteur (Buck – converter)

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à gauche du *MPP*.

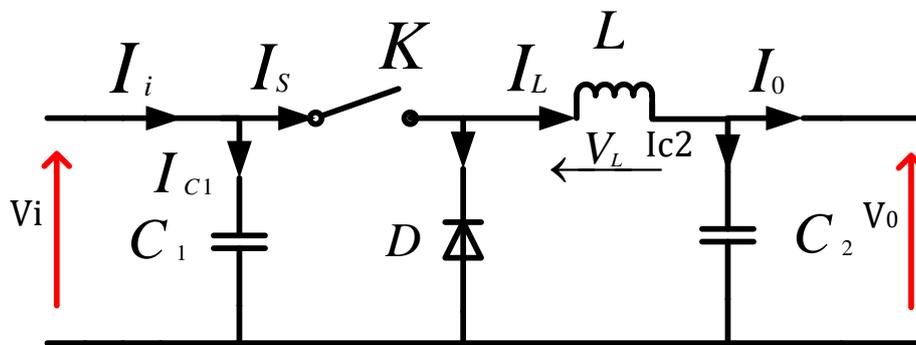


Figure II.13. Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Buck

Savoir le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique. Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La Figure II.13 montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur  $K$  fermé pendant  $dTs$  et ouvert pendant  $(1-d) Ts$  [22,23].

Où :

$Ts$ : est la période de commutation.

$D$ : le rapport cyclique du commutateur ( $d \in [0, 1]$ ).

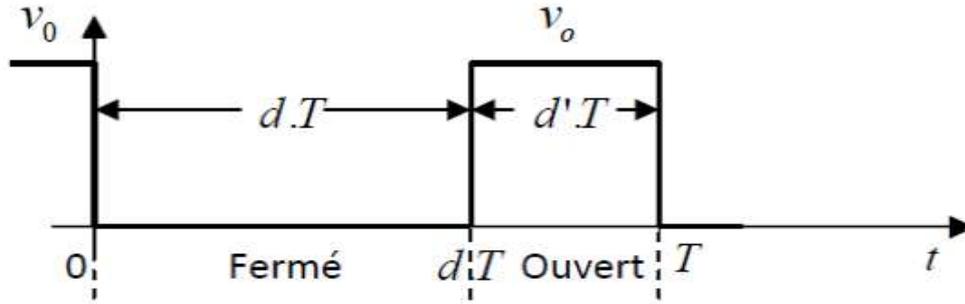


Figure II.14. Périodes fermeture et ouverture d'un interrupteur

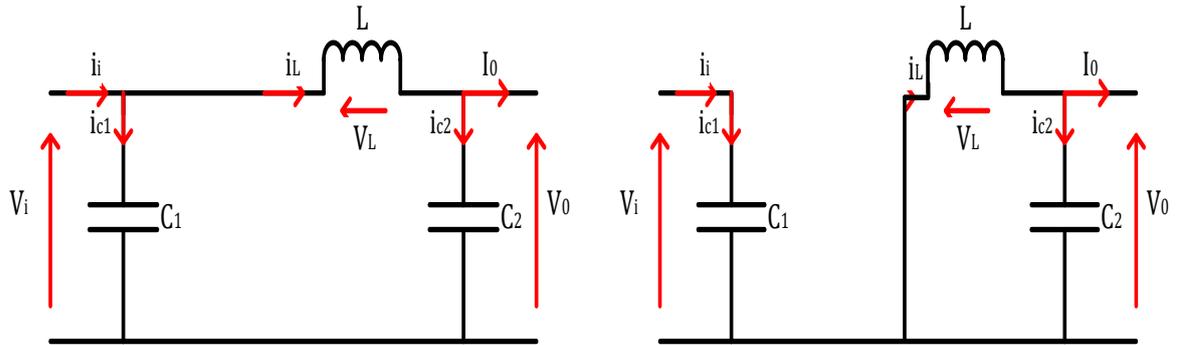


Figure II.15. Schémas équivalents du hacheur dévolteur (a) : K fermé, (b) : K ouvert

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient :

- Pour la première période  $dTs$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_o(t) \\ V_l(t) = L \frac{di_l}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

- Pour la deuxième période  $(1-d)Ts$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_o(t) \\ V_l(t) = L \frac{di_l}{dt} = -V_o(t) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période  $T_s$ , on utilise généralement l'expression suivante [24] :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_{T_s} = \frac{dx}{dt_{DT_s}} + \frac{dx}{dt_{(1-D)T_s}} (1 - D) \quad (\text{II.16})$$

En appliquant la relation (II.16) sur les systèmes d'équations (II.14) et (II.15), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{cases} c_1 \frac{dV_i(t)}{dt} T_s = dT_s(i_i - i_l) + (1 - d)T_s i_l \\ c_2 \frac{dV_o(t)}{dt} T_s = dT_s(i_l - i_o) + (1 - d)T_s(i_l - i_o) \\ L \frac{di_l}{dt} = dT_s(V_i - V_o) + (1 - d)T_s(-V_o) \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{cases} i_o(t) = i_l(t) - c_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_l(t) \\ i_l(t) = \frac{1}{d} \left( i_o(t) - c_2 \frac{dV_o(t)}{dt} \right) \\ V_i(t) = \frac{1}{d} \left( L \frac{di_l}{dt} + V_o(t) \right) \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

### II.4.2 Convertisseur survolteur (Boost – convertter)

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. La Figure II.16 représente le circuit électrique du convertisseur Boost. Au premier temps ( $dT$ ), l'interrupteur  $K$  est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, l'interrupteur  $K$  s'ouvre et l'inductance s'opposant à la diminution de courant  $I_L$ , génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge à travers la diode [25,23].

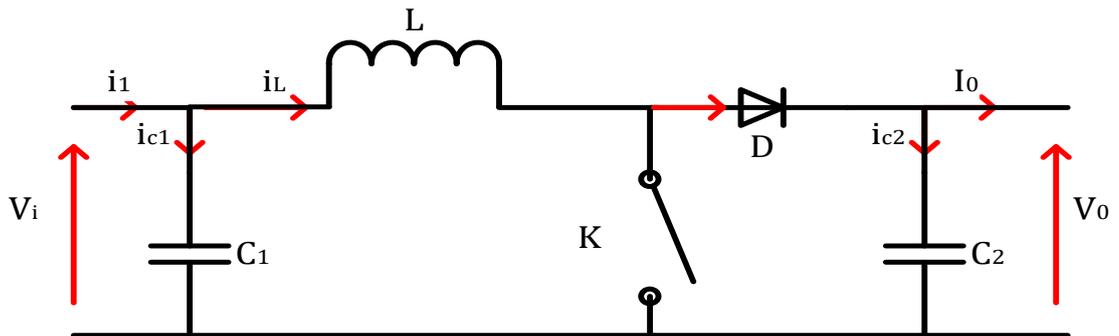
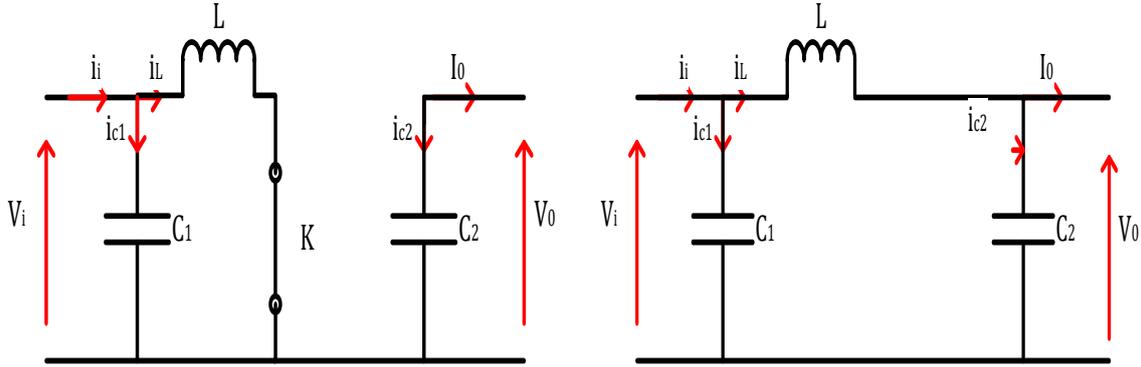


Figure II.16. Schéma de principe d'un convertisseur Boost

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur des deux phases de fonctionnement donne les équations suivantes [24] :



**Figure II.17.** Schémas équivalents du hacheur survolteur (a) : K fermé, (b) : K ouvert

➤ Pour la première période  $dTs$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ v_l(t) = L \frac{di_l}{dt} = -v_i(t) \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

➤ Pour la deuxième période  $(1-d)Ts$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = L \frac{di_l}{dt} = v_i(t) - v_0(t) \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

En appliquant la relation (II.16) sur les systèmes d'équations (II.19) et (II.20), comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [24].

$$\begin{cases} i_l(t) = i_i(t) - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ i_0(t) = (1-d)i_l - c_2 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ v_i(t) = L \frac{di_l}{dt} + (1-d)v_0 \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

### II.4.3 Le convertisseur Buck-Boost

La troisième topologie de base de ce convertisseur est donnée par la Figure II.18, dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation cependant, la tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Lorsque l'interrupteur  $K$  est fermé le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée et quand l'interrupteur  $K$  est ouvert, la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode.

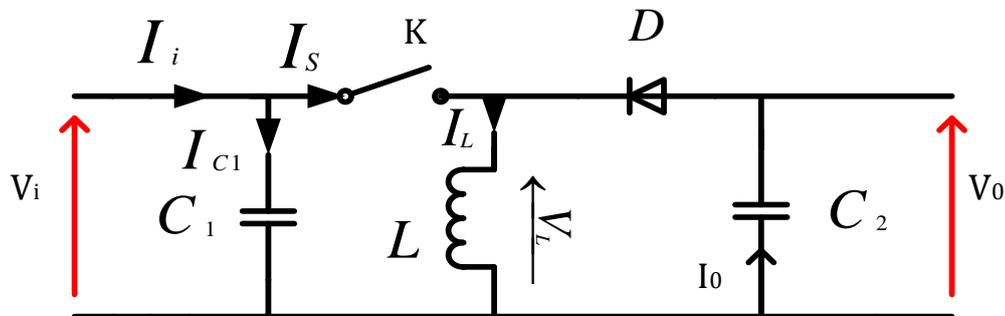


Figure II.18. Convertisseur dévolteur-survolteur

La figure II.19 montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur survolteur pour les deux cycles deux fonctionnements [24].

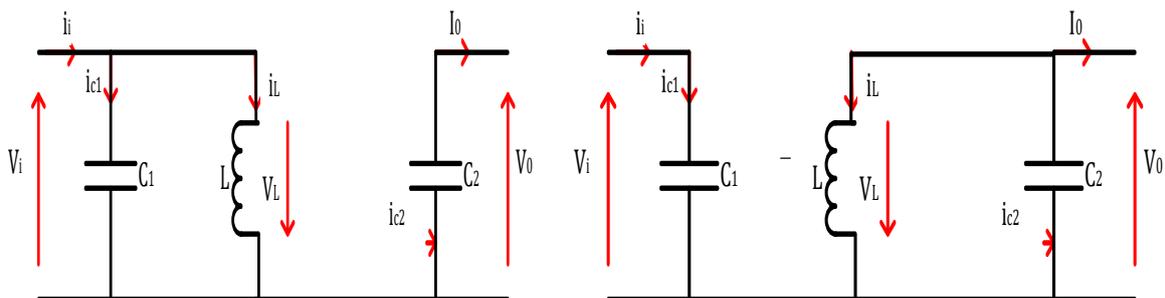


Figure II.19. Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur (a) : K ouvert, (b) :K fermé

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient :

➤ Pour la première période  $DT_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ v_l(t) = L \frac{di_l}{dt} = -v_i(t) \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

➤ Pour la deuxième période  $(1-d)Ts$ :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = L \frac{di_l}{dt} = v_0(t) \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

En appliquant la relation (II.16) sur les systèmes d'équations (II.22) et (II.23), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur-survolteur [24] :

$$\begin{cases} i_l(t) = \frac{1}{d} \left( i_i(t) - c_1 \frac{dV_i(t)}{dt} \right) \\ i_0(t) = -(1-d)i_l - c_2 \frac{dV_0(t)}{dt} \\ V_i(t) = V_0(t) = \frac{1}{d} \left( -(1-d)V_0 + L \frac{di_l}{dt} \right) \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

## II.5 Modélisation du groupe motopompe

### II.5.1 Le Moteur

Les pompes sont alimentées par un moteur électrique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Ils fonctionnent soit en alternatif, soit en continu.

Trois types de moteurs qui sont utilisés dans les systèmes de pompage PV :

- Les moteurs à courant continu.
- Les moteurs à courant alternatif.
- Les moteurs à courant continu, sans balais, à commutation électronique (Brushless permanent magnetic DC Motors) [26].

Les critères qui permettent d'établir le choix le plus judicieux du moteur sont les suivants [24] :

- Bon rendement.
- Souplesse de fonctionnement.
- Robustesse du matériel afin de limiter au maximum l'entretien et les risques de pannes.
- Fiabilité et autonomie de l'installation.
- Faible puissance au démarrage.

### II.5.1.1 Le moteur à aimant permanent sans balais

Les moteurs sans balais ‘brushless’ permettent d’obtenir des ratios performances/encombrement très impressionnants par rapport aux technologies plus conventionnelles. Associée à un système électronique, l’amélioration des performances de cette technologie est continue depuis une vingtaine d’années.

La technologie ‘brushless’ trouve sa place dans la chaîne de traction électrique et hybride des véhicules là où l’encombrement et le poids doivent être optimisés, en robotique, véhicules électriques, outillages portatifs, ventilateurs ou encore disques durs.

Le défaut principal des moteurs à courant continu est la présence des balais, qui engendrent des frottements, des parasites, et limitent la durée de vie du moteur par leur usure. Pour éviter tous ces problèmes on utilise des moteurs ‘brushless’.

### II.5.1.2 Description d’un moteur brushless : [27]

Le stator est constitué de bobines d’excitation qui sont généralement au nombre de 3 ou de 6. Celles-ci sont le plus souvent connectées en étoile, mais elles peuvent également être connectées en triangle. Le rotor est constitué d’aimants permanents comportant 2 à 8 pôles avec une alternance des pôles Nord et Sud.

La plupart des moteurs BLDC comprennent également un ensemble de trois capteurs à effet Hall qui, positionné à  $60^\circ$  ou à  $120^\circ$  l’un de l’autre, permettent de connaître la position du rotor. La connaissance de la position du rotor permet à un circuit électronique auxiliaire d’effectuer les commutations de l’alimentation.

### II.5.1.3 Caractéristique du BLDC

Les moteurs *BLDC* ont de nombreux avantages par rapport aux moteurs à courant continu et des moteurs à induction. Quelques-uns d’entre eux sont :

- Meilleure vitesse par rapport à la réponse de couple
- Réponse dynamique élevée
- Haute efficacité
- durée de vie longue
- Fonctionnement silencieux

En outre, le rapport du couple délivré à la taille du moteur est plus élevé, ce qui est utile dans les applications où l’espace et le poids sont des facteurs critiques. Idéalement, les moteurs *BLDC* ont des *FEMs* de forme d’onde trapézoïdale et sont nourris avec des courants du stator rectangulaires, qui donnent un couple théoriquement constant.

### II.5.1.4 Modèle mathématique d'un moteur brushless

Les Équations Électriques qui régissent le fonctionnement du moteur BLDC sont données par les équations suivantes [28].

$$\vec{V} = [R] \vec{I} + \frac{d\vec{\phi}}{dt} \quad (\text{II.25})$$

$$\vec{\phi} = [L] \vec{I} + \overline{\varphi M} \quad (\text{II.26})$$

Où :

$\vec{V}$ ,  $\vec{I}$  et  $\vec{\phi}$  sont des vecteurs représentant la tension, le courant et le flux magnétique pour chaque phase respectivement.

$\overline{\varphi M}$  : est le vecteur du flux magnétique créé par l'aimant permanent.

[R] et [L] sont les matrices résistances et inductances de la machine données par les matrices suivantes :

$$[R] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}$$

Le modèle mécanique du moteur BLDC est donné par l'équation (II.27)

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - f\Omega - C_r \quad (\text{II.27})$$

Avec :

$\Omega$  : la vitesse angulaire en *rad/s*

$C_e$  : le couple électromagnétique développé en *N/m*

$C_r$  : est le couple de charge en *N/m*

$f$  : est le coefficient de frottement en *N.(m/rad).s<sup>-1</sup>*

### II.5.2 Modélisation de la pompe :

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu trois paramètres, la hauteur manométrique, le débit et la vitesse. La hauteur de pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique [29].

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

$$P_h = R_{mp} \cdot P_{ele} = p \cdot g \cdot HMT \cdot Q \quad (\text{II.28})$$

Avec :

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

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

$R_{mp}$  : Rendement du groupe motopompe (%)

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

$p$ : Masse volumique de l'eau (1000 Kg/m<sup>3</sup>)

$Q$ : Débit volumique (m<sup>3</sup>/s).

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

La pompe centrifuge oppose un couple résistant  $C_r$  :

$$C_r = K_r \cdot \Omega^2 \quad (\text{II.29})$$

Avec :

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

$K_r$  : Coefficient de proportionnalité [(Nm/ (rad.s-1)<sup>2</sup>] qui est exprimé par l'équation suivante :

$$K_r = \frac{P_n}{\Omega_n^3} \quad (\text{II.30})$$

Avec :

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

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

### II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modalisation des différents composants du système de pompage photovoltaïque (panneau photovoltaïque, convertisseur DC/DC et le groupe motopompe. Nous avons présenté les caractéristiques courant/tension et puissance/tension du module photovoltaïque pour des variations des conditions météorologiques, a fin de faciliter l'accès a la simulation.

# **Chapitre III :**

Simulation du système de  
pompage photovoltaïque

### III. Introduction

Dans le présent chapitre nous allons montrer les différentes simulations effectuées sur un système PV constitué principalement d'un panneau PV, charge et hacheur. Ce dernier est piloté par la technique de commande MPPT Perturbation & Observation (P&O) permettant une meilleure adaptation source/charge, pour un transfert maximum de puissance. De ce fait, la simulation est la seule manière d'évaluer la performance d'un contrôleur numérique à rétroaction dans un système avant d'établir un prototype réel.

Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/SIMULINK.

#### III.1 Commande et contrôle des éléments du système

Le système étudié est constitué par des générateurs PV, convertisseur DC-DC et un moteur BLDC et une pompe. Le convertisseur DC-DC est commandé suivant une stratégie qui a pour but la recherche permanente du point de puissance maximum (MPPT).

La figure III.1 illustre une disposition synoptique de l'ensemble du système

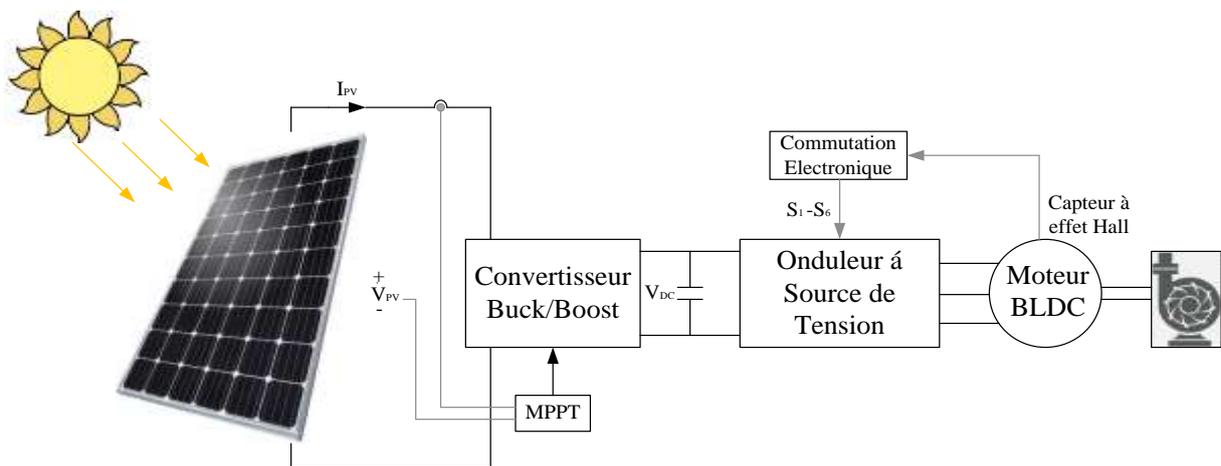


Figure III.1. Schéma synoptique du système PV

Avant de présenter les résultats de simulation du système global, nous allons décrire la commande des éléments composant notre système.

##### III.1.1 La commande du point de puissance maximale (MPPT)

La production de l'énergie solaire photovoltaïque est non linéaire et elle varie en fonction de l'intensité lumineuse et de la température. Par conséquent, le point de

fonctionnement du panneau photovoltaïque (PV) ne coïncide pas toujours avec le point à maximum de puissance. On utilise alors un mécanisme qui permet la recherche et la poursuite du point à maximum de puissance appelé «Maximum power point tracking» (MPPT) afin que la puissance maximale soit générée en permanence. [30]

Par définition, une commande MPPT, associé à un étage intermédiaire DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quels que soit les conditions météorologiques (irradiation, température), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$ ).

Afin d'optimiser la puissance produite par le champ photovoltaïque, plusieurs méthodes peuvent être utilisées [30] :

- La méthode d'ajustement de courbe.
- La méthode « look-up table ».
- La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur.
- La méthode de court circuit.
- La méthode Perturbation Observation (P&O).
- La méthode d'incrément de conductance.
- Les méthodes avancées (logique floue, réseaux de neurones).

Le système de poursuite du point de puissance maximale que nous avons choisi est la méthode perturbation & observation (P&O). Vu sa facilité d'implémentation, elle permet d'obtenir un bon rendement. [30]

### III.1.1.1 La méthode Perturbation & Observation (P&O)[30]

La méthode Perturbation & observation (P&O) est l'une des méthodes les plus utilisées. C'est une méthode itérative permettant d'obtenir le PPM ; on mesure les caractéristiques du panneau PV puis on induit une petite perturbation sur la tension (ou le courant) afin d'analyser la variation de puissance qui en résulte.

Comme indique précédemment, le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{pv}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{pv}$  qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure III.2, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{pv}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{pv}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se

trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a déjà dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît.

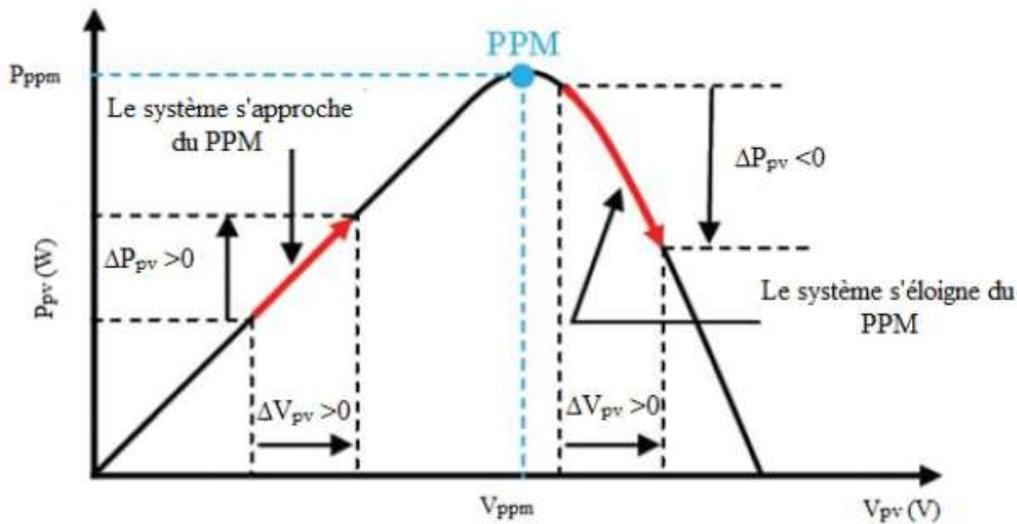


Figure III.2. Caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$  d'un panneau photovoltaïque

À partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

La figure III.3 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (mesurant le courant et la tension des panneaux PV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de part sa facilité d'implémentation. Cependant, elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité, ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

Il est connu que ce type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée, où le PPM évolue lentement et proportionnellement avec le soleil. Par contre, pour une journée avec de forts et fréquents changements d'irradiations, cette commande présente beaucoup plus de pertes, en raison du temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau PPM.

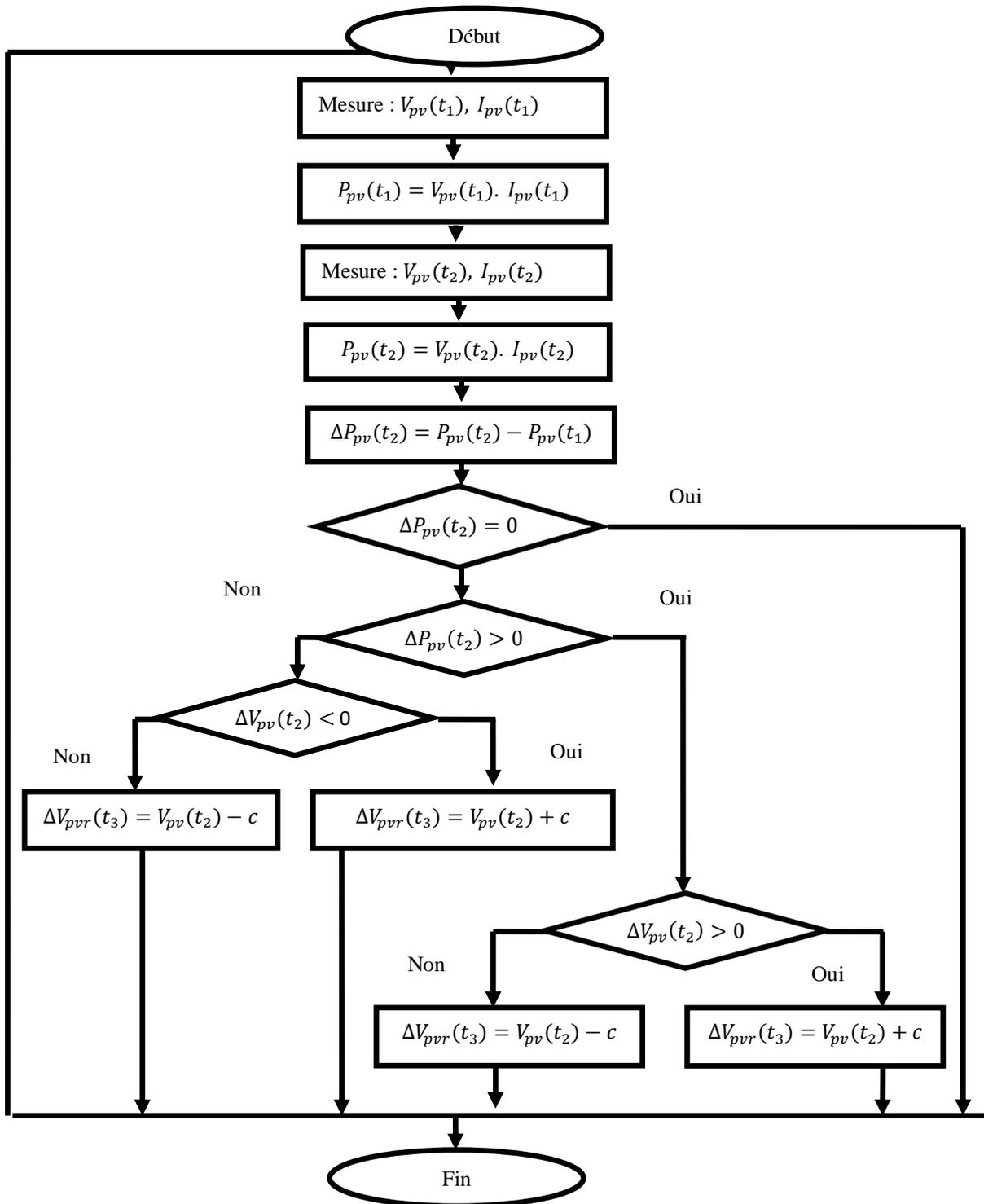


Figure III.3. Organigramme de la méthode perturbation et observation

### III.1.1.2 Test de la méthode Perturbation & Observation (P&O)

Pour faire une étude de la robustesse de la technique proposée vis-à-vis des différentes conditions environnementales on effectue les tests suivants :

Nous soumettons les systèmes contrôlés à différentes conditions environnementales :

- ✓ D'abord, on maintient une température constante ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ) et on varie l'éclairement solaire suivant une variation rapide ou bien lente :
- ✓ Ensuite, on maintient l'éclairement solaire à une valeur fixe ( $1000\text{ W/m}^2$ ) et on varie la valeur de la température suivant une variation rapide ou bien lente.
- ✓ Et enfin, on soumet le contrôleur MPPT à des changements aléatoires des variables de température et de l'ensoleillement.

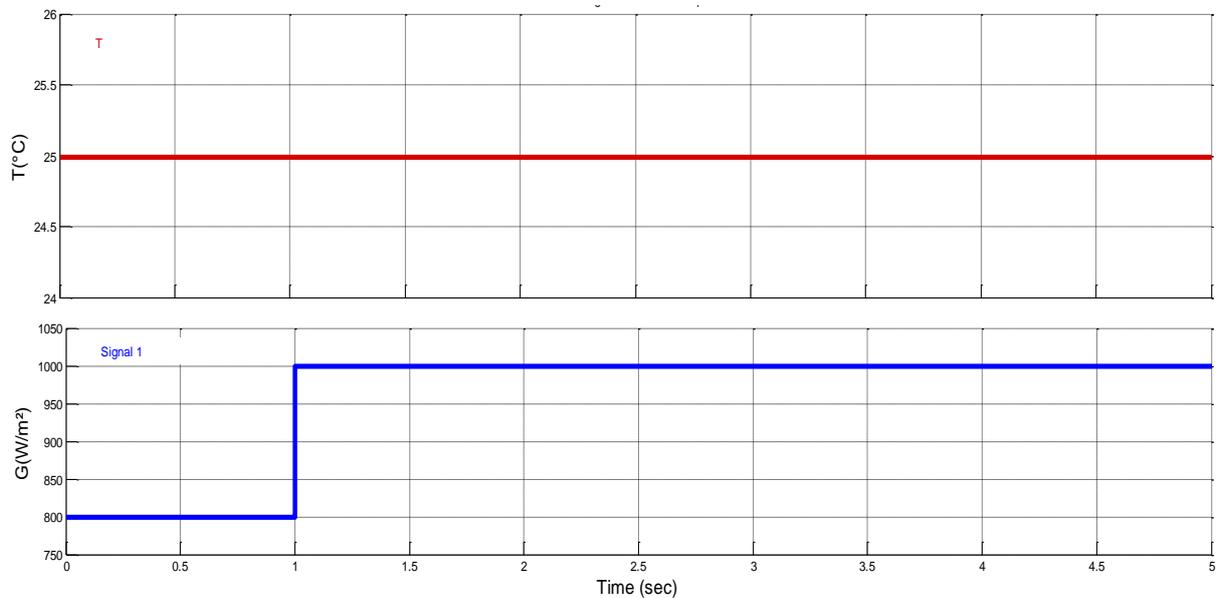


Figure III.4. Variation de la température et l'ensoleillement en fonction du temps

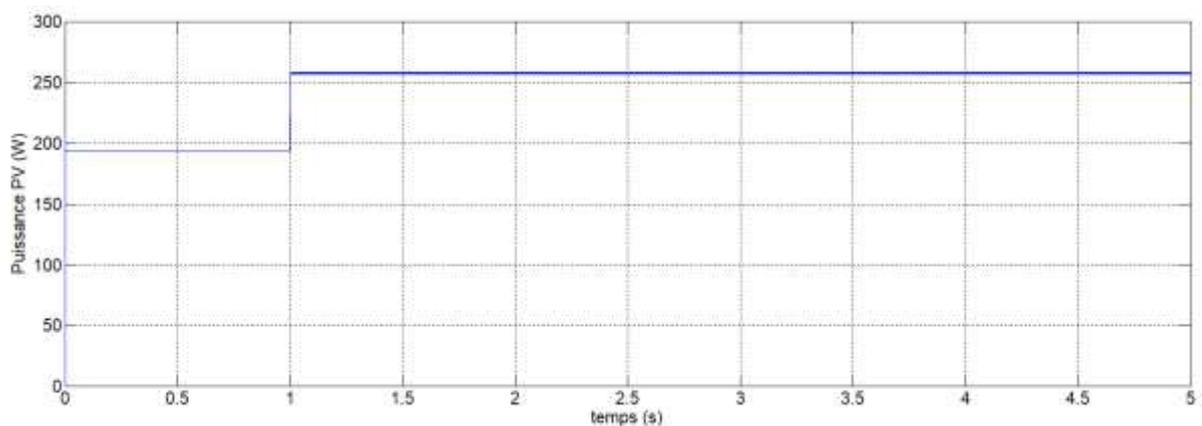
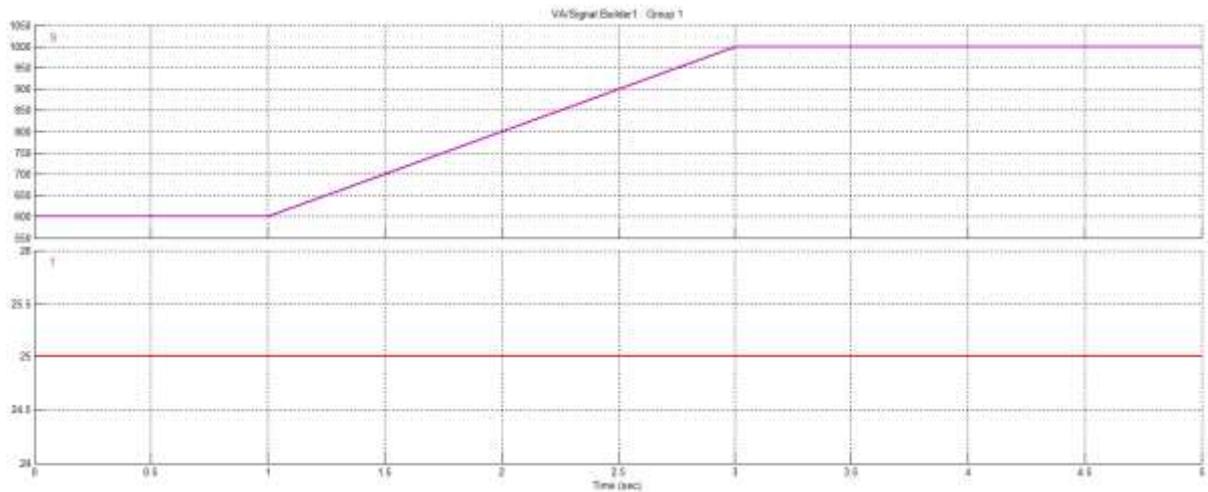
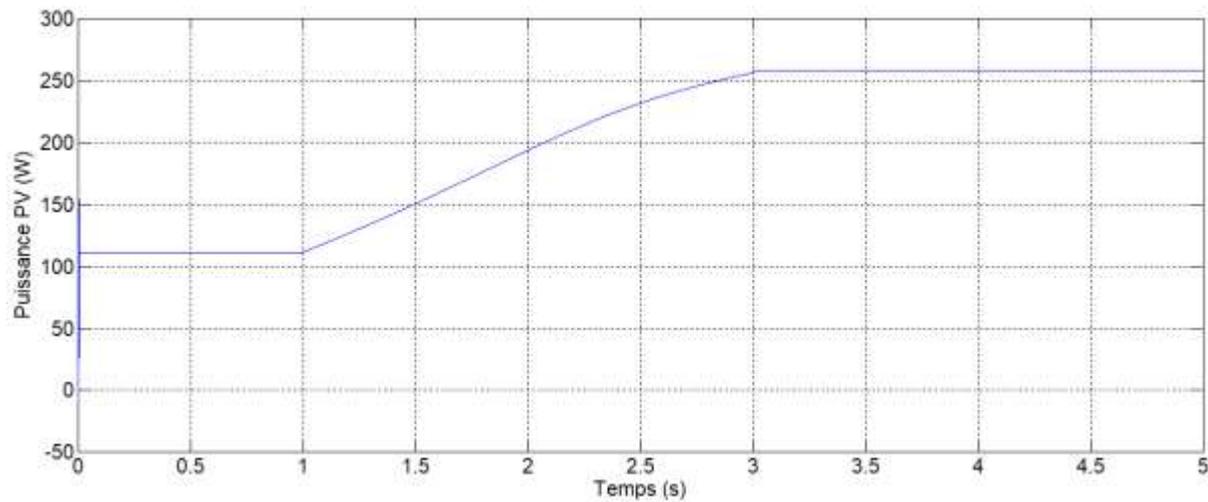


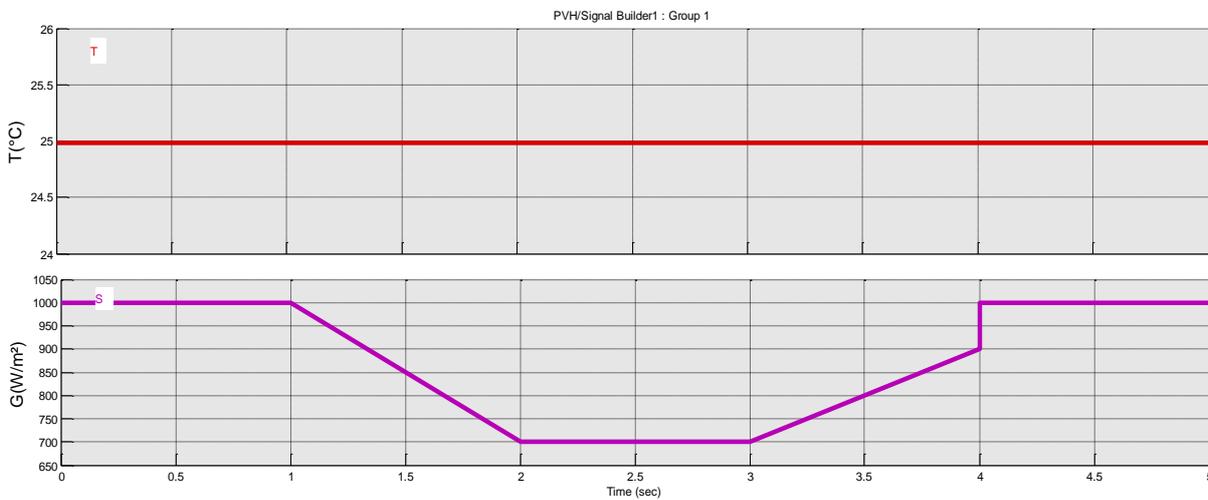
Figure III.5. Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps



**Figure III.6.** Variation de la température et l'ensoleillement en fonction du temps



**Figure III.7.** Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps



**Figure III.8.** Variation de la température et l'ensoleillement en fonction du temps

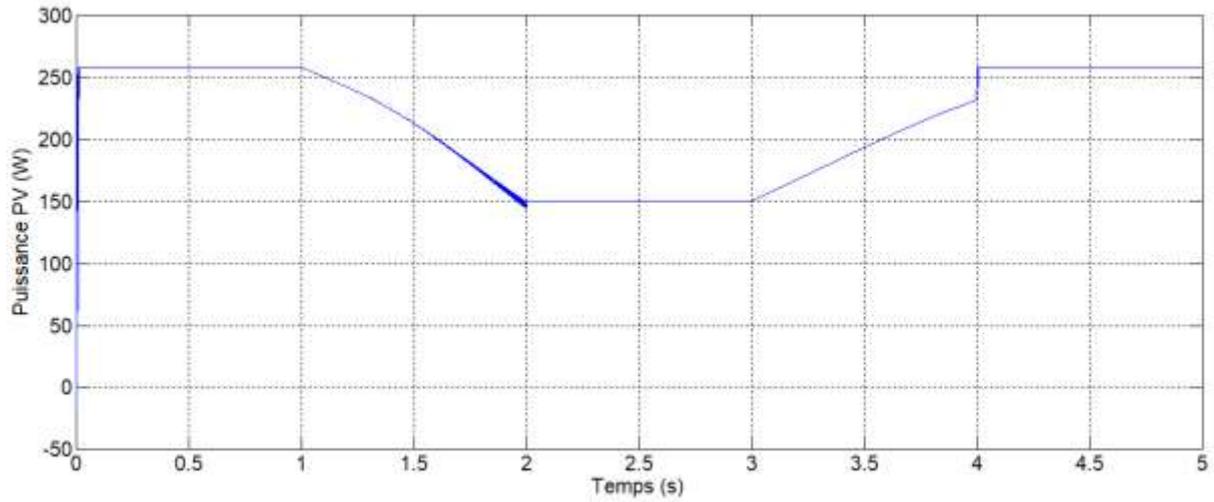


Figure III.9. Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps

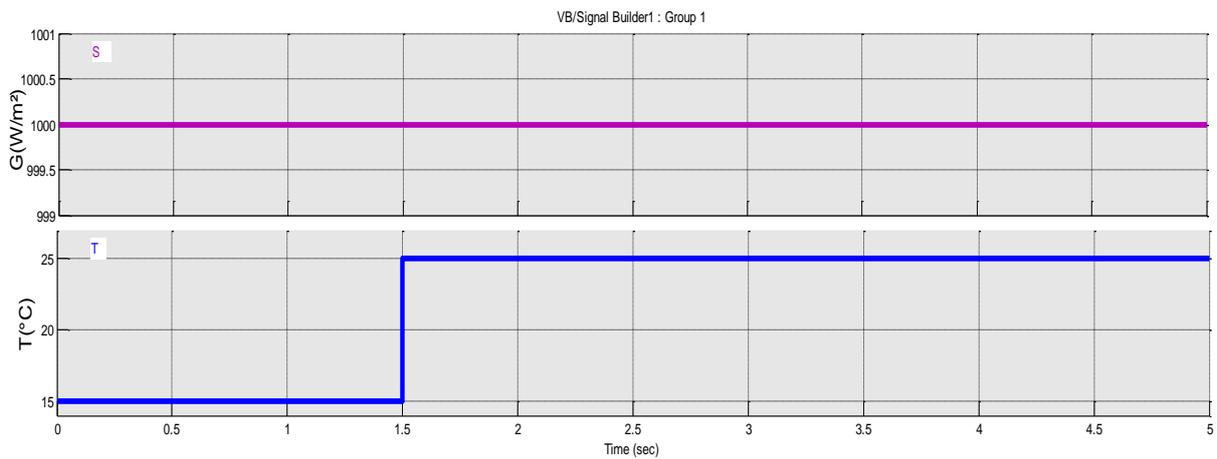


Figure III.10. Variation de la température et l'ensoleillement en fonction du temps

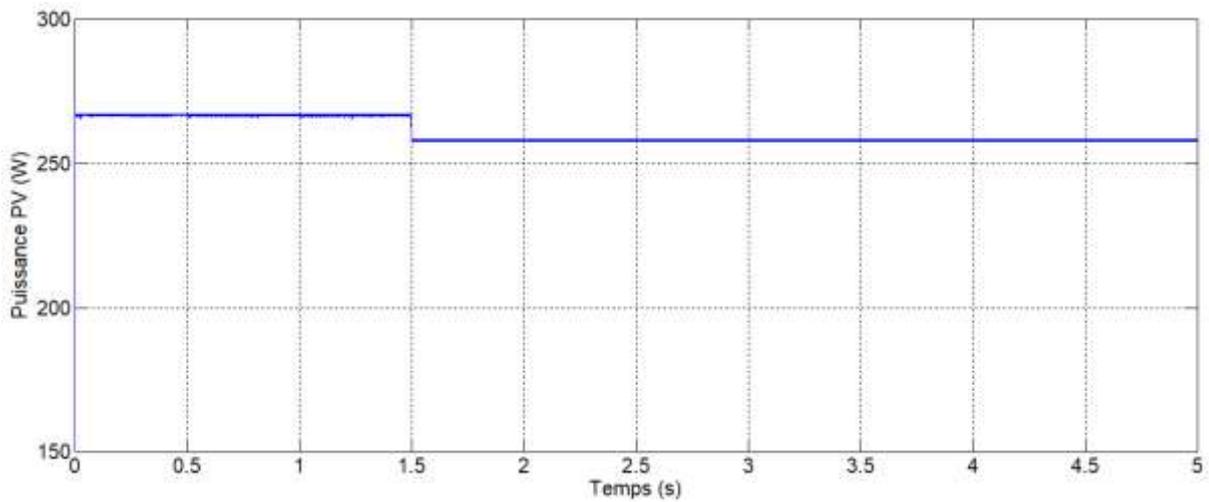


Figure III.11. Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps

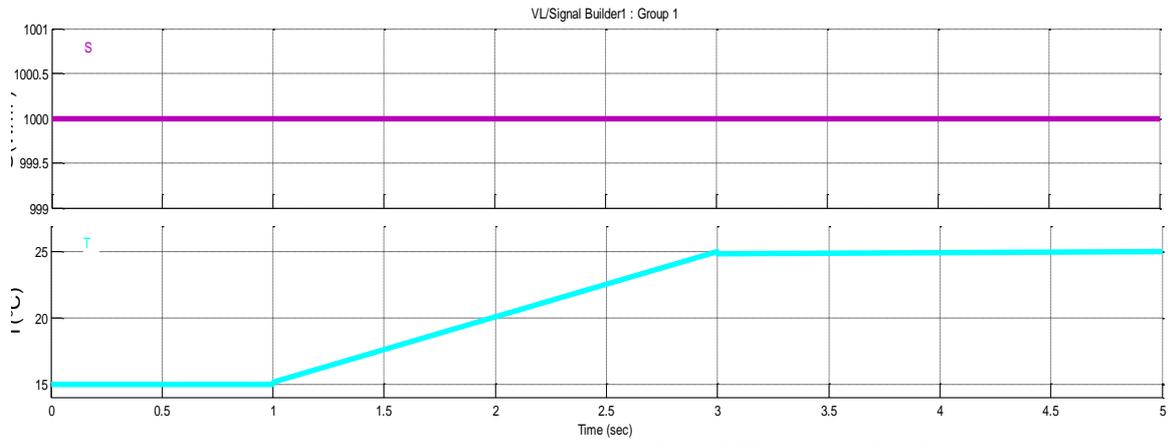


Figure III.12. Variation de la température et l'ensoleillement en fonction du temps

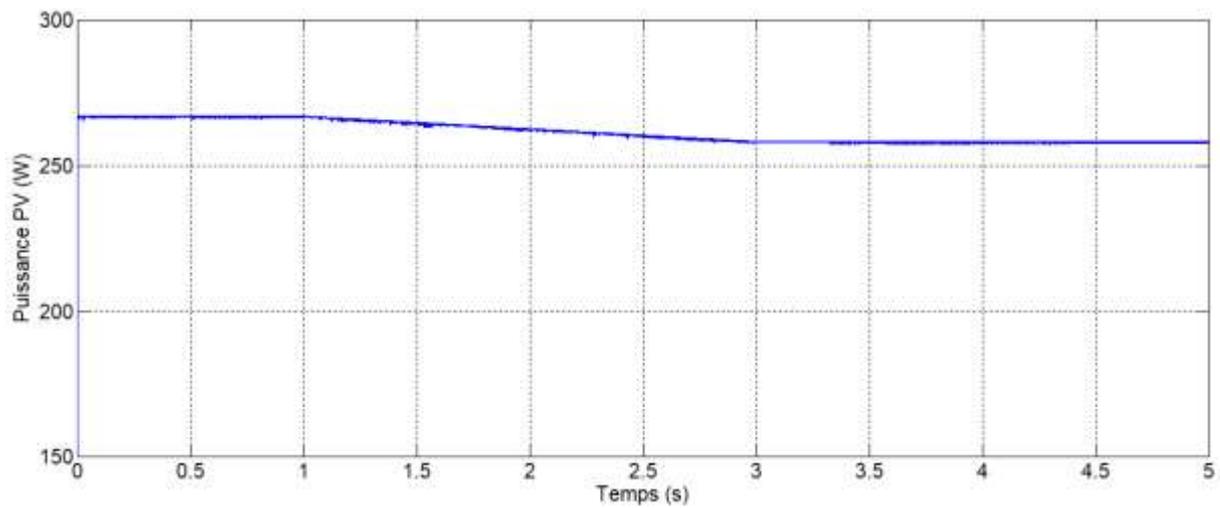


Figure III.13. Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps

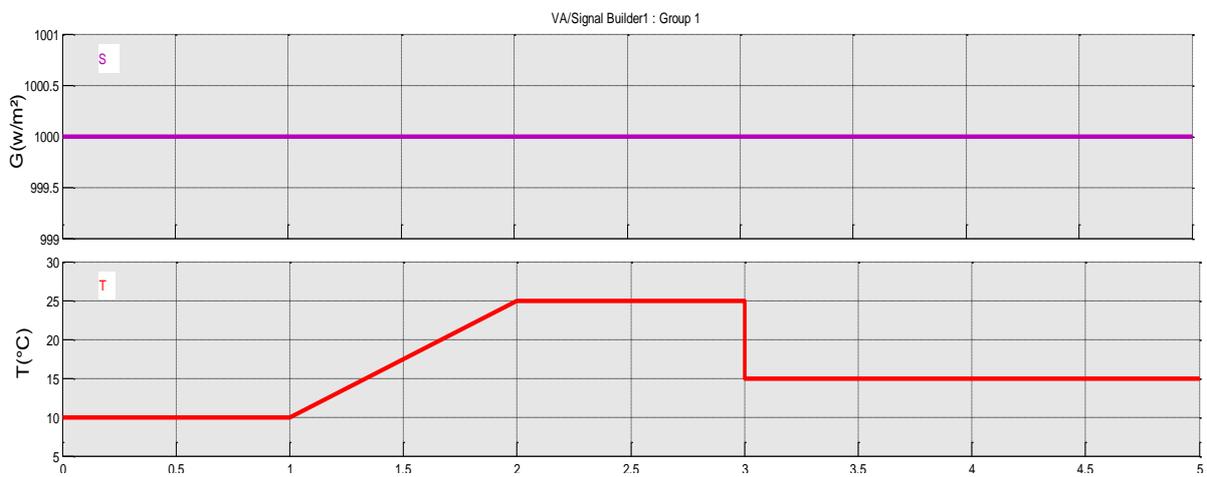
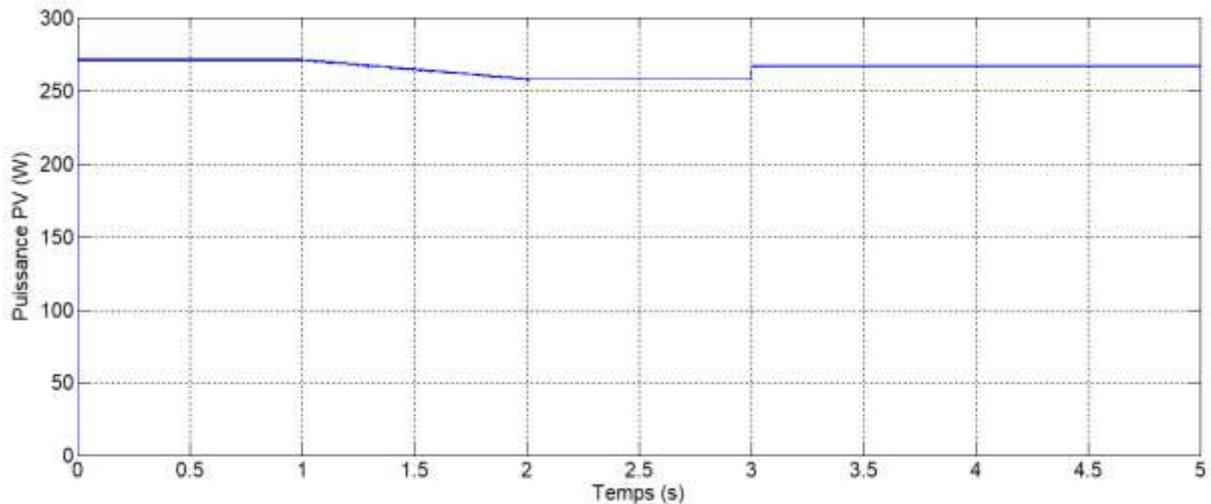


Figure III.14. Variation de la température et l'ensoleillement en fonction du temps

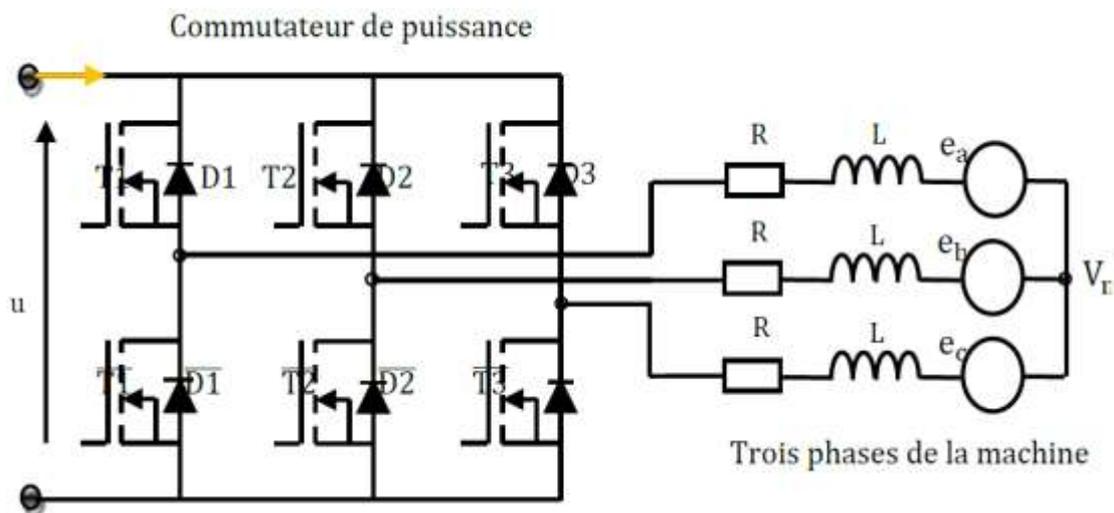


**Figure III.15.** Evolution de la puissance du panneau photovoltaïque en fonction du temps

Les résultats obtenus lors de ce test indiquent que le contrôleur MPPT suit la consigne (variation de l'ensoleillement) et il donne des résultats satisfaisants. Il présente aussi une très bonne poursuite. L'augmentation de la température implique toujours une diminution de la puissance.

### III.1.2 Commande du moteur BLDC

Le moteur BLDC nécessite un commutateur électronique pour assurer l'alimentation successive des enroulements. Le schéma de principe de ce commutateur électronique est donné par la figure III.16 [31].

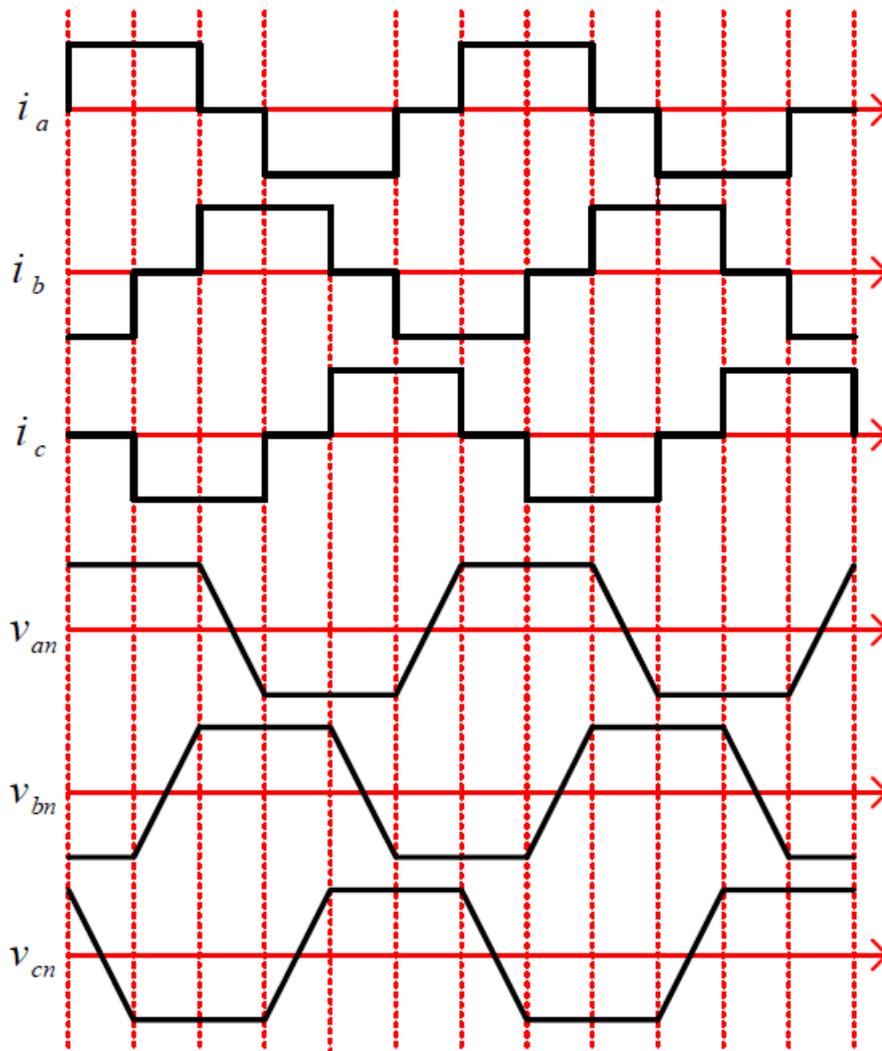


**Figure III.16.** Ensemble moteur-commutateur

Nous supposons que :

- Les trois phases du moteur sont entièrement symétriques et produisent des FEMs induites périodiques de formes trapézoïdales.
- Le temps de commutation entre les phases est séparé avec  $60^\circ$  électrique [32].

Les formes typiques des FEMs induites et des courants dans les trois phases sont illustrées par la figure III.17.

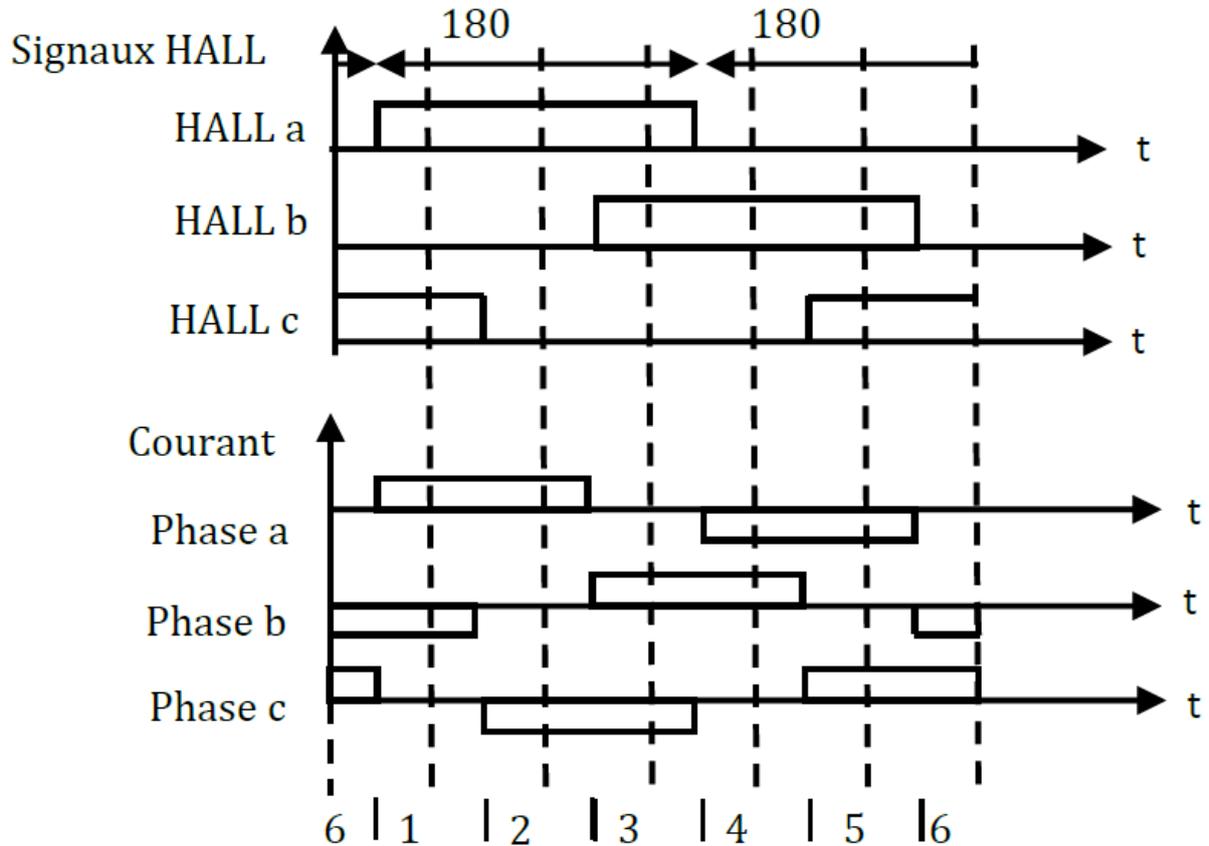


**Figure III.17.** Formes typiques des courants et des FEMs

La présence d'un capteur de position est nécessaire pour piloter un moteur BLDC. Son rôle consiste à déterminer la position du rotor par rapport au stator. Dans ce travail, nous avons choisi de détecter la position du rotor par le capteur à effet hall à chaque  $60^\circ$  électrique.

Pour imposer des courants rectangulaires dans les enroulements de la machine, nous choisissons la commande à  $120^\circ$  utilisant un régulateur à hystérésis. [31]

Le principe de cette commande consiste à imposer des courants rectangulaires au plateau de largeur  $120^\circ$  électriques avec les FEMs de phase correspondantes [32]. On distingue six intervalles de  $60^\circ$  électriques (appelés secteurs) de fonctionnement selon la position du rotor. Ces positions sont détectées par les signaux fournis par le capteur à effet hall. Dans chaque secteur, uniquement deux phases de la machine sont alimentées [32].



**Figure III.18.** Signaux à effet hall

Le tableau III.1 montre l'état des commutateurs suivant les signaux des capteurs à effet Hall

$\Theta$ ( $^\circ$ )	Signaux des capteurs			Etat des commutateurs					
	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>6</sub>
0-60	1	0	1	0	1	1	0	0	0
60-120	0	0	1	0	1	0	0	1	0
120-180	0	1	1	0	0	0	1	1	0
180-240	0	1	0	1	0	0	1	0	0
240-300	1	1	0	1	0	0	0	0	1
300-360	1	0	0	0	0	1	0	0	1

**Tableau III.1.** États de commutation pour les commutateurs électronique

Le tableau III.2 montre les paramètres de la machine utilisée.

Puissance	1.8 Kw
Tension DC	310 V
Nombre de pôles	4
Inertie	3.5 kg.cm <sup>2</sup>
Constante de tension	78V/ktours.mn <sup>-1</sup>
Constante du couple	0.74 Nm/A
Résistance d'une phase	2.3Ω
Inductance d'une phase	7.68mH

**Tableau III.2.** Paramètres du BLDC utilisé.

### III.2 Dimensionnement du système de pompage PV

Le dimensionnement a pour but de déterminer d'une part le nombre de modules solaires à utiliser dans l'installation qui est déduit d'un calcul effectué sur la puissance crête des générateurs solaires, et d'autre part la puissance absorbé par le moteur (MCC), toute cette panoplie de paramètres est déduite à partir des données d'ensoleillement du site concerné, ainsi des besoins électriques de l'utilisateur. Le choix des composantes du système solaire doit permettre à l'usager d'utiliser les équipements requis durant la période demandée (c'est à-dire période annuelle ou déterminée), et ce avec une disponibilité prédéterminée.

#### III.2.1 Evaluation des besoins en eau

La détermination des besoins en eau pour la consommation d'une population donnée dépend essentiellement de son mode de vie. Les besoins en eau estimés pour les zones rurales des pays pauvres sont de l'ordre de 20 litres par personne et 30 litres par tête de bétail.

Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, des facteurs météorologiques comme la température, l'humidité, la vitesse de vent, l'évapotranspiration du sol, la saison de l'année considérée et de la méthode d'irrigation. Cependant, il est important de se baser sur la pratique et l'expérience locale. La capacité du réservoir sera déterminée selon les besoins en eau journaliers et l'autonomie requise du système. [33]

#### III.2.2 Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire

Pour le calcul de l'énergie hydraulique on doit tenir compte de deux facteurs :

- La quantité d'eau requise
- La hauteur manométrique totale (*HMT*) à la quelle cette eau doit être élevée pour pouvoir être utilisée.

La puissance hydraulique nécessaire pour assurer le déplacement de la quantité d'eau d'un niveau à un autre est donnée par la formule suivante :

$$P_H = Q_m \cdot \rho \cdot g \cdot HMT \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$Q_m$  : Est le débit horaire moyen de la pompe centrifuge

$\rho$  : Densité de l'eau (1000 kg/m<sup>3</sup>)

$g$  : Constante de la gravité

### III.2.3 Dimensionnement de la pompe centrifuge

Comme on l'a déjà dit lors du calcul de la puissance hydraulique nécessaire, la connaissance de cette puissance nous ramène à dimensionner la pompe avec un débit et une hauteur supposés connus. Pour notre système, le débit nominal ( $Q_n$ ) de la pompe est égal à 21m<sup>3</sup> /h.

La hauteur manométrique totale (HMT) correspond au débit nominal est égale à 12m, on aura alors une puissance hydraulique :

$$P_H = \frac{21}{3600} \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot 12 = 0.69 \text{ kW}$$

Or que, la puissance mécanique ( $P_{mec}$ ) que reçoit la pompe pour assurer la puissance hydraulique et qui dépend du rendement ( $\eta_p$ ) de la pompe est :

$$P_{mec} = \frac{P_H}{\eta_p} \quad (\text{III.2})$$

Si le rendement de la pompe centrifuge est de 55%, la puissance mécanique requise par la pompe sera :

$$P_{mec} = \frac{0.69}{0.55} = 1.25 \text{ kW}$$

Cette puissance est généralement donnée par le constructeur de la pompe choisie. La connaissance de cette puissance permet de choisir le moteur d'entraînement.

### III.2.4 Dimensionnement du moteur

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

$$P_{ele} = \frac{P_{mec}}{\eta_m} \quad (III.3)$$

Avec :

- $\eta_m$  : Rendement du moteur.
- $P_{ele}$  : Puissance électrique nécessaire pour que le moteur fonctionne.

Pour notre cas :

$$P_{ele} = \frac{1.25}{0.85} = 1.47 \text{ kW}$$

Or que la puissance électrique demandée ( $P_d$ ) qui devra être réellement fournie transite par les convertisseurs statiques, ce qui occasionne une perte de puissance, ce qui nous permet donc de tenir compte du rendement ( $\eta_{ond}$ ) de la conversion DC-AC de l'onduleur comme suit :

$$P_d = \frac{P_{ele}}{\eta_{ond}} \quad (III.4)$$

Le rendement de l'onduleur est de l'ordre de 95%, ce qui nous donne donc :

$$P_d = \frac{1.47}{0.95} = 1.55 \text{ kW}$$

D'où les besoins énergétique en électricité journalière peuvent être évalués comme suit :

$$E_c = P_d \cdot t_p \text{ (en } \frac{kWh}{j} \text{)} \quad (III.5)$$

Tel que :

$E_c$  : est l'énergie journalière demandé par la charge (groupe motopompe)

$t_p$  : est le temps de pompage nécessaire pour satisfaire le besoin en eau et qui se calcul comme suit :

$$t_p = \frac{V}{Q_n} = \frac{70}{21} = 3,33 \frac{\text{heures}}{\text{jour}}.$$

Avec : V : la consommation quotidienne du village qui est estimée à 70 m<sup>3</sup>.

D'où l'énergie journalière  $E_c$  demandée par la charge sera égale à :

$$E_c = P_d \cdot t_p = 1,55 \cdot 3,33 = 5,16 \frac{kWh}{j}$$

### III.2.5 Dimensionnement du générateur PV

La puissance du générateur photovoltaïque ( $P_g$ ) à installer doit tenir compte de l'énergie journalière demandée par la charge ( $E_c$ ), de la durée moyenne journalière de l'ensoleillement (égale à  $t_p$ ) et des pertes qu'on suppose égale à environ 20% de la puissance attribuables à la température, la poussière et les pertes du convertisseur DC-DC.

Donc la puissance théorique du générateur PV est donnée par :

$$P_g = \frac{E_c}{t_p \cdot (1 - \text{pertes})} \quad (\text{III.6})$$

Le nombre de panneaux nécessaire se calcule par :

$$N \geq \frac{P_g}{P_s} \quad (\text{III.7})$$

Avec  $P_s$  : Puissance normalisée du panneau (puissance maximale délivrée par le générateur photovoltaïque à un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ ).

Pour notre cas on prend un module de puissance  $P_s$  égale à  $260 \text{ W}$ .

D'où :

$$P_g = \frac{5,16 \cdot 1000}{3,33 \cdot (1 - 0,2)} = 1937 \text{ W}$$

Donc, le nombre de panneaux nécessaire est de :

$$N \geq \frac{1937}{260} = 7,45$$

On prend alors,  $N=8$  panneaux.

### III.3 Simulation du system global

Pour la simulation de notre système de pompage photovoltaïque on prend le cas d'une journée aléatoire de l'année dont les variations de l'éclairement et de température sont données par la figure III.19 respectivement. Avec l'exploitation de la puissance maximale produite par le générateur PV pour les différentes valeurs d'éclairement et de température, on utilisant la commande P&O présentée précédemment.

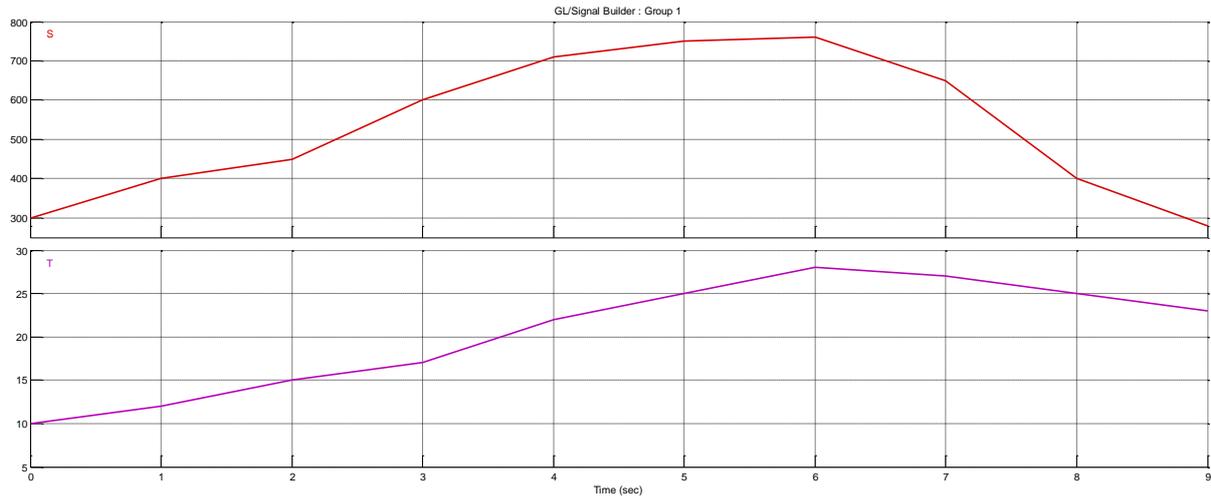


Figure III.19. Variation de l'ensoleillement et de la température

Les courbes de courant, de la tension et de puissance obtenues à la sortie des panneaux photovoltaïques sont les suivantes :

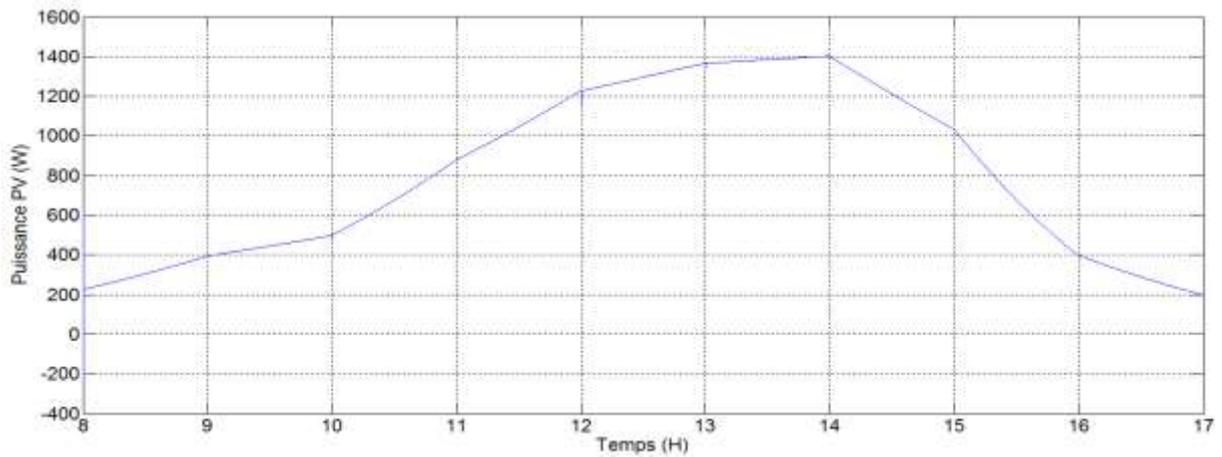


Figure III.20. Puissance optimale à la sortie des panneaux photovoltaïques

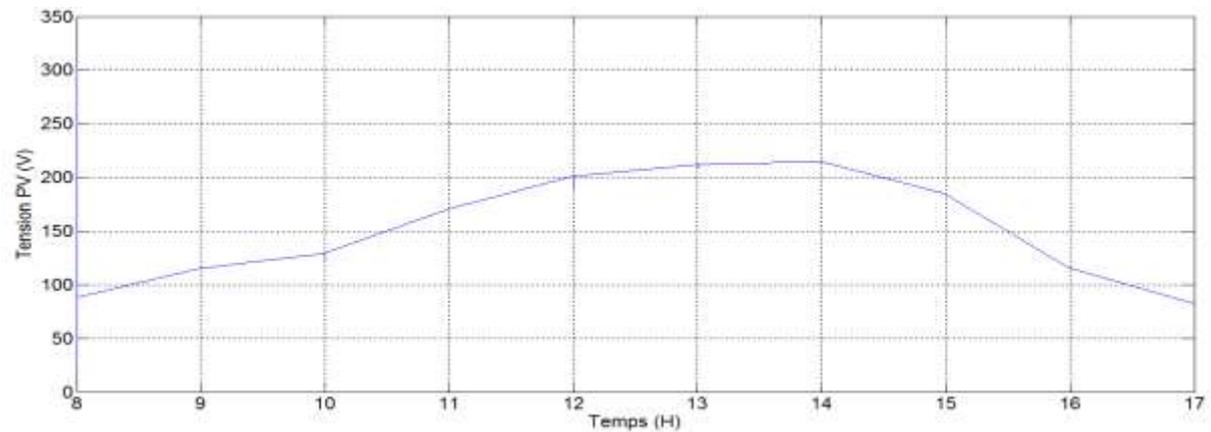


Figure III.21. Tension optimale à la sortie des panneaux photovoltaïques

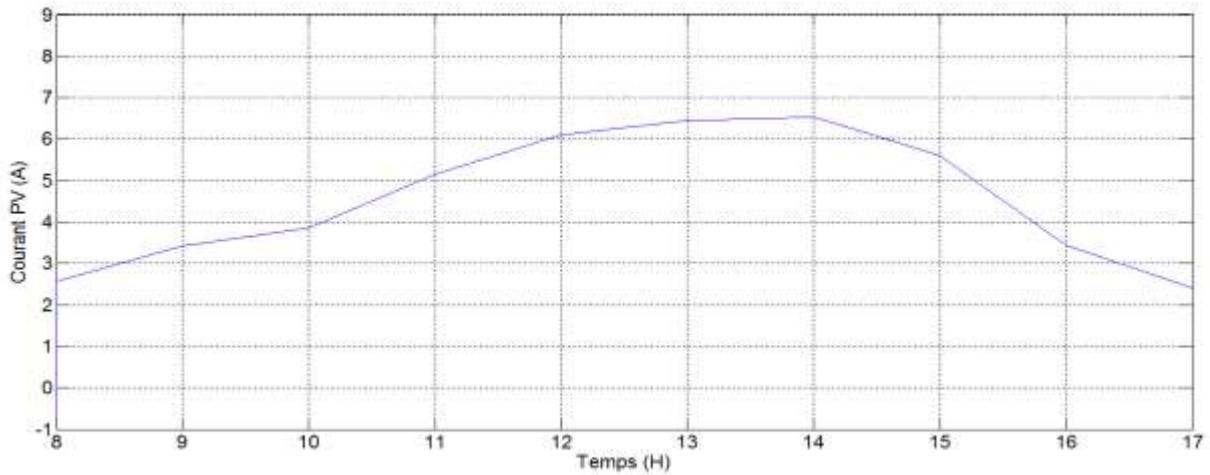


Figure III.22. Courant optimal à la sortie des panneaux photovoltaïques

Les variations climatiques influent énormément sur les paramètres électriques délivrés par les générateur PV. La puissance maximale délivrée par les GPVs est entre 13h et 14h lorsque l'éclairement est à son maximum.

La simulation de système de pompage photovoltaïque nous donne les résultats suivants :

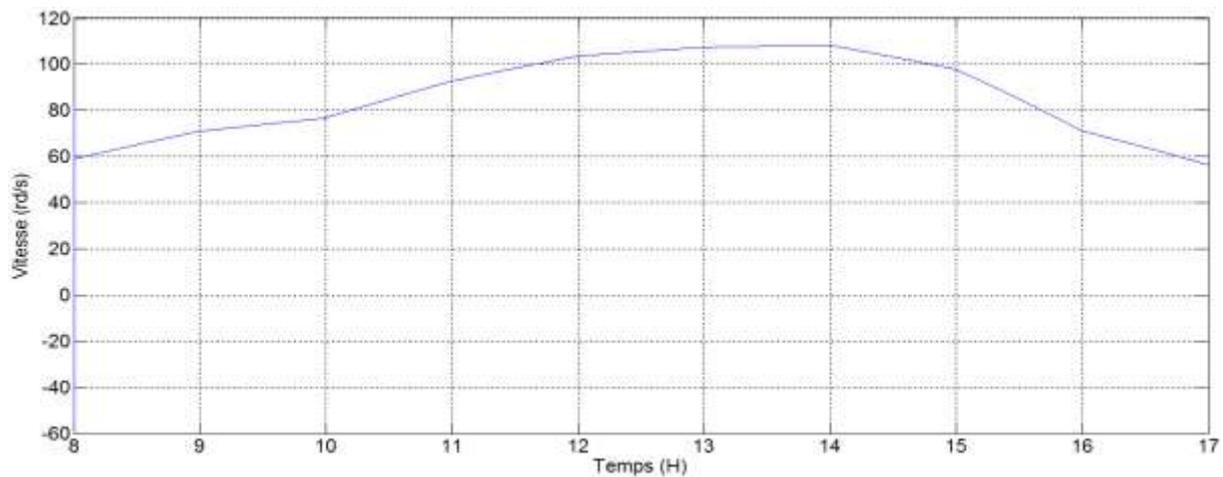


Figure III.23. Vitesse de rotation du groupe motopompe

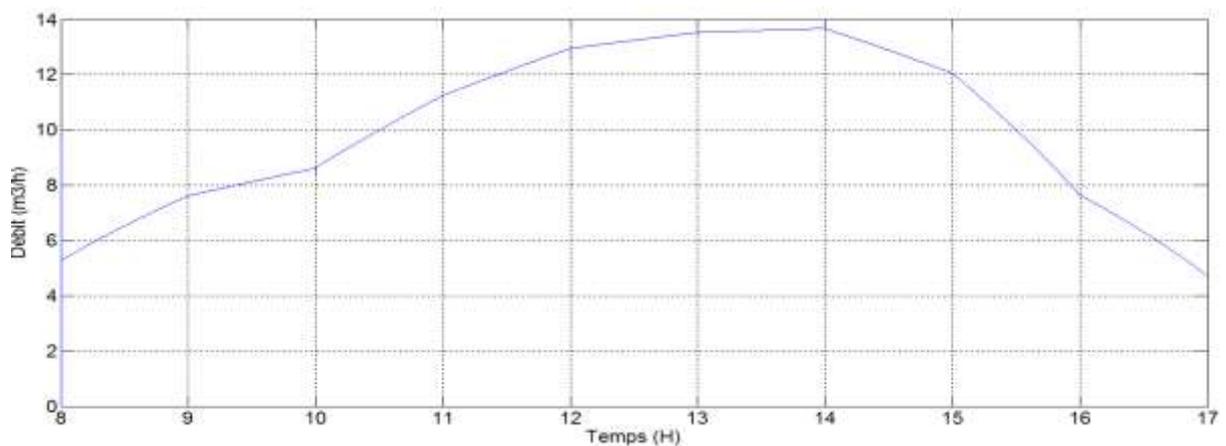


Figure III.24. Débit d'eau pompé par la pompe

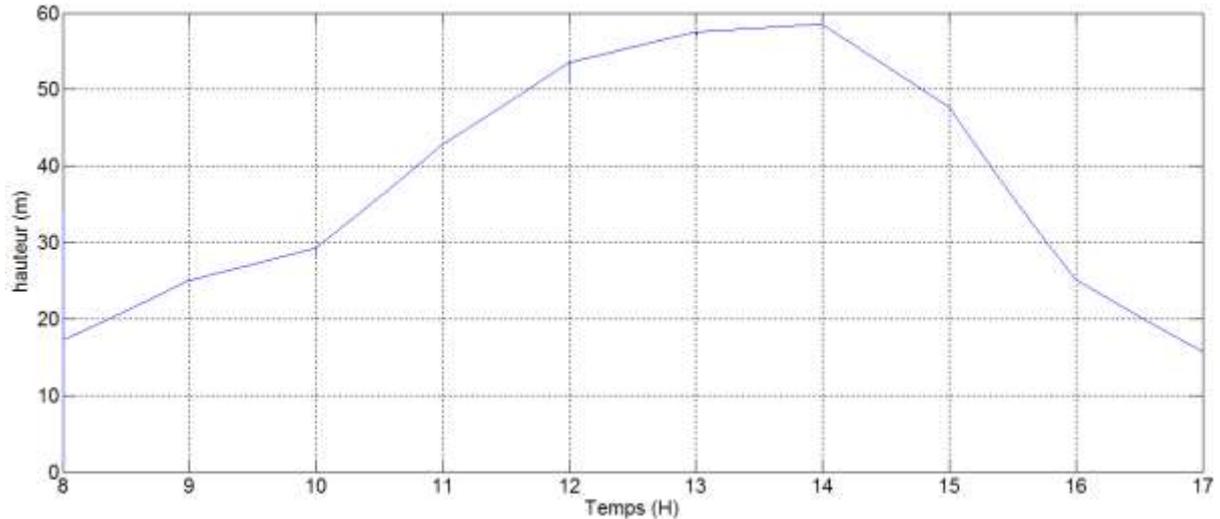


Figure III.25. Hauteur manométrique

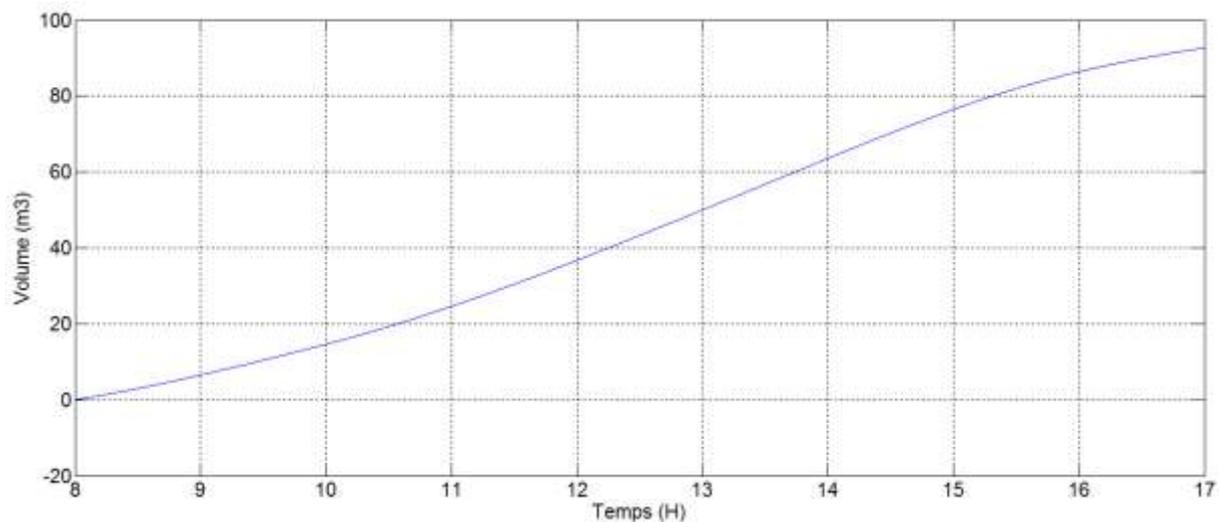


Figure III.26. Volume pompé par le groupe motopompe

A partir des courbes obtenues, on remarque que :

La vitesse de rotation du groupe motopompe varie en fonction de l'éclairement cela veut dire que pour des valeurs de l'éclairement, le débit délivré par la pompe est en fonction de l'éclairement solaire, une variation de l'éclairement engendre une variation de puissance délivrée par le générateur qui va être ressentie par la machine.

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les techniques de commandes des différents éléments qui composent le système, puis nous avons dimensionné les différents composants du système de pompage PV, afin de connaître le nombre de panneaux à utiliser pour satisfaire

## Chapitre III : Simulation du système de pompage photovoltaïque

---

les besoins en eau d'un nombre déterminés d'individus, dont la consommation journalière en eau.

La commande MPPT du convertisseur (DC-DC) nous permet d'avoir de bon rendements de conversion du générateur photovoltaïque et cela quelque soit la variation des conditions climatiques.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Notre travail s'est porté sur contribution à la modélisation et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque.

Dans le premier chapitre, nous avons donné un aperçu sur l'énergie photovoltaïque, ces avantages et ces inconvénients et les différents systèmes photovoltaïque en générale. Nous nous intéressés à l'application pompage au fil du soleil.

Ensuite, Nous avons présentés les modèles électriques d'un générateur photovoltaïque, et l'influence de la température et l'ensellement sur les caractéristiques du module photovoltaïque avec la modélisation des différents composants du système.

Afin d'exploiter les générateurs photovoltaïques au maximum, l'algorithme utilisé pour la recherche du point de puissance maximale est la P&O «Méthode de perturbation et d'observation».

Dans le troisième chapitre nous avons fait une étude de la robustesse de la méthode Perturbation & Observation (P&O), puis nous avons dimensionné les différents composants du système de pompage PV, et la simulation du système global.

Enfin Pour utiliser un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, le convertisseur DC-DC associé doit être contrôlé par un algorithme traqueur du point de puissance maximale. A cet effet, nous nous sommes intéressés particulièrement à l'application de l'algorithme basé sur la perturbation et l'observation (P&O) dans le contrôle des convertisseurs DC-DC. Les résultats de simulation ont montrés des bonnes performances en termes de poursuite de la puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque. La commande MPPT (P&O) permet la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge et elle le force toujours à fonctionner au point de puissance maximale.

### Perspectives

Un travail de recherche n'est jamais fini, En effet, les perspectives de ce travail sont tellement nombreuses, qu'on se limite au niveau de celles ayant un impact direct avec notre projet.

L'une des perspectives les plus importantes que nous avons pu réaliser dans ce travail est le concept d'adaptation source/charge, pour cela différentes méthode de commandes MPPT ont été exposées dans la littérature, avec un intérêt particulier à la commande P&O. De ce fait l'essor dans la compréhension de cette approche nous a qualifié à une certaine

## Conclusion générale

---

maturité, de pouvoir spécifier quelques améliorations dans le future, qu'on peut dénombrer dans les éléments suivants :

- ✓ Exploitation de nouveaux algorithmes MPPT.
- ✓ Utilisation de l'approche neuronale ou celle de la logique floue.
- ✓ Implémentation sur une carte DSP ou FPGA.
- ✓ Combiner la source photovoltaïque avec une autre énergie renouvelable pour former un système hybride.

# **Références Bibliographiques**

## Référence bibliographiques

---

- [1] **M. Capderou**, ‘Atlas Solaire de l’Algérie, Modèles et Expérimentaux 2011 Synthèse bibliographique par Pr. A/Malek ROULA.
- [2] **A. HAMMIDAT, A. HADJ ARAB et M.T. BOUKADOUM** «Performances et coûts des systèmes de pompage PV en Algérie », Revue des Energies Renouvelables. Vol. 8 pp (157 - 166), 2005.
- [3] **D. BOUKHERS** « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage » Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2007
- [4] **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.
- [5] **M.Orgeret**, «Les piles solaires, le composent et ces applications» Préface de F.Allest.
- [6] **F.SALMA**, «Modélisation d'un système multi générateur photovoltaïque interconnecte au réseau électrique», Magister en Electrotechnique. Université de Sétif 2011.
- [7] **Djarallah, Mohamed**, «Contribution a l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couples au réseau électrique», Université de Batna, Thèse de Doctorat en Science, 2008.
- [8] **Debili, Narimen**, « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque ». Université de Constantine I, These de Doctorat, 2015.
- [9] **A. Oi**. « Design and simulation of photovoltaic water pumping system », These de Doctorate, California Polytechnic State University San Luis Obispo, 2005.
- [10] **J. Royer,T. Djako, E.Schiller, B.Sadasy** « Le pompage photovoltaïque », Manuel de Cours à l'intension des Ingénieurs et des Techniciens, Université d'Ottawa,1998.
- [11] [http://www.electrosup.com/convertisseur\\_boost.php](http://www.electrosup.com/convertisseur_boost.php)
- [12] **D.R. Chouiter**« Conception et réalisation d'une commande robuste de machine Asynchrone», Thèse CEGELY, Lyon, Ecole Centrale de Lyon, 1997.
- [13] **A. BELHOCINE et S.ZAIDI**« Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome » Mémoire de Master. Université de Bejaïa, 2012

- [14] **A. Saadi**, «Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque» Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2000.
- [15] **K. THIERRY, S. MAURICE** « Système Photovoltaïque : Dimensionnement pour pompage d'eau, pour une irrigation goutte-à-goutte » ; Mémoire de DEA en Physique Appliquée Option : Semi-conducteurs ; université de OUAGADOUGOU, 2007.
- [16] **Sy M. Mansour Niang & Souleymane Diop**, Mémoire «Les pompes solaires : Dimensionnement d'une station de pompage en zone maraîcher» Institut Supérieur de Technologie Industrielle-DIT Electrotechnique- Electromécanique-Froid et Climatisation, 2008.
- [17] **Hindmarsch.J**, Electrical machine and their applications, Pergamon Press 1984.
- [18] **M.Masour niang & Souleymane Diop**. Mémoire« Les pompes solaires : Dimensionnement d'une station de pompage en zone maraîcher » Institut Supérieur de Technologie Industrielle-DIT électrotechnique-Electromécanique-Froid et Climatisation.2008.
- [19] **M.Keciri, N.Benmessaoud**,«Etude et modélisation de puissance d'un système photovoltaïque» Mémoire de Master de l'université de Bejaia 2014.
- [20] **K. Kety, et all**, Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque : Cas du module polycristallin Ecoline LX-260P installé au dispensaire de Sévagan (Togo)», Revue des Energies Renouvelables, 2016, 19(4),PP : 633 – 645.
- [21] **A. Lyes**, «Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque» Mémoire de Magister, université de Tizi ousou. 2011
- [22] **S. Issaadi**, « Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2006.
- [23] **N. Abouchabana**, «Etude d'une nouvelle topologie buck-Boost appliquée à un MPPT » ; Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2009.
- [24] **M. Moulay-Amar et M. Loghouini**, « Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur, université de Ouargla, 2005.
- [25] **Mme. OBEIDI**, « Commande des hacheurs MPPT par logique floue », Ecole Nationale Polytechnique » Mémoire de Magister Université el Harrach, 2006.
- [26] **Mr. MEFLAH AISSA**. « Modélisation et commande d'une chaine de pompage Photovoltaïque». Mémoire de Magister. Université ABOU BEKR BELKAID – Tlemcen.2011.
- [27] **T.Wildi et G.Sybille**, livre «*électrotechnique*» Canada, Decock, 2000

- [28] **H. B. Hansen et All**, «A Hybrid Model of a Brushless DC Motor», 16<sup>th</sup> IEEE International Conference on Control Applications Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control. Singapor, page 10, octobre 2007.
- [29] **R. Chenni** « Etude technico-économique d'un système de pompage Photovoltaïque dans un village solaire » Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2007.
- [30] **A.T.Singo** «système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome», Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, FRANCE, 2010.
- [31] **A. Moussi, A. Torki**: « An improved efficiency permanent magnet brushless DC motor PV pumping system». *LARHYSS Journal*, N°.01, Mai 2002.
- [32] **A. Terki** : « control flou- génétique hybride d'un moteur BLDC dans un système de pompage photovoltaïque ».Thèse de doctorat, Université de Biskra. 2011.
- [33] **A. Louadah**, « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Master, Université de Bejaia, 2009.
- [34] **Tarek Bouguerra** « Optimisation d'un système photovoltaïque : Application en continu et en alternatif » mémoire de magister université de constantine1 2014 page 17.
- [35] : <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-cellule-photovoltaïque-comment-ca-marche>
- [36] : [https://www.researchgate.net/figure/Fig3-Constitution-Dun-Moteur-a-courant-continu\\_fig2\\_292953833](https://www.researchgate.net/figure/Fig3-Constitution-Dun-Moteur-a-courant-continu_fig2_292953833)
- [37] [http://pedagogie.aclimoges.fr/sti\\_si/accueil/FichesConnaissances/Sequence3SSi/co/S3B22\\_Association\\_modele\\_composant\\_33.html](http://pedagogie.aclimoges.fr/sti_si/accueil/FichesConnaissances/Sequence3SSi/co/S3B22_Association_modele_composant_33.html)