

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de Technologie  
Département d'Electronique et des Télécommunications



Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Electronique  
Domaine : **Sciences et Technologie**  
Filière : **Electronique**  
Spécialité : **Instrumentation**  
Thème

**Conception et simulation de la commande MPPT  
dans le cas d'hacheur boost & Z-source**

**Présenté Par :**

- 1) **Mr. MOUEDDEN** Boudjemaâ
- 2) **Mr. HADDOUCHI** Mohammed

**Devant le jury composé de :**

<b>Pr. BENCHERIF</b> Kaddour	Professeur	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
<b>Dr. CHAIB</b> Amina	MAB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
<b>Dr. HELAL</b> Melouka	MAB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	invité
<b>Dr. Ghezali</b> Sanaa	MAB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

*Année Universitaire 2023/2024*

## ***Dédicace***

*C'est avec un grand plaisir que je dédie ce modeste travail à l'être le plus cher de ma vie, ma mère. À celui qui m'a fait de moi un homme, mon père. À Mes chers frères et sœurs. À tous mes amis de promotion de master 2ème année en électronique -instrumentation et toute personne qui occupe une place dans mon cœur.*

*À tous les membres de ma famille. Aussi mes chers amis Haddouchi Mohammed et Benbouzaine el Farouk.*

*Je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite surtout Docteur Ghezali Sanaa.*

**Boudjemaâ**

## ***Dédicace***

*C'est avec un grand plaisir que je dédie ce modeste travail à l'être le plus cher de ma vie, ma mère.*

*Celui qui m'a fait de moi un Homme, mon père.*

*A mes chers frères Moussa, Walid et sœurs Soumia, Nassiba, asma et A ma Deuxième famille, Mohammed El Amin et Khair-Eddine (Benet maghnia) et A tous mes amis de promotion de Master et toute personne qui occupe une place dans mon cœur.*

*Aussi mon cher Amis Moudden Boudjemaà .*

*Je dédie ce Travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite surtout Docteur Ghezali Sanaa.*

**Mohammed**

# Remerciements

*Nous remercions, en premier lieu, notre Dieu qui a bien voulu nous donner la force pour effectuer le présent travail. En second lieu, nous tenons à remercier notre promoteur **Docteur GHEZALI SANAA** pour ses conseils, sa compétence et ses orientations durant l'élaboration de ce projet. Nous remercions tous les enseignants de département Electronique et Télécommunication pour leurs rôles importants dans notre formation. Ainsi nous exprimons notre reconnaissance à tous les membres de jury, **Professeur BENCHERIF KADDOUR** et **Docteur CHAIB AMINA**, **Docteur HELAL MELOUKA**, d'avoir accepté de lire ce manuscrit et d'apporter les critiques nécessaires à la mise en forme de cet ouvrage.*

*Enfin, à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce projet de fin d'étude*

# Table des matières

Table des matières .....	I
Table des figures .....	III
Liste des tableaux.....	V
Symboles et Acronymes.....	VI
Introduction générale .....	1

## **I. Généralités sur les convertisseurs de puissance (Hacheur boost & convertisseur Z-source)**

I.1 Introduction.....	4
I.2. Les Convertisseur DC-DC( les hacheurs).....	4
I.2.1 Domaines d'utilisation des hacheurs .....	5
I.2.2 Types des hacheurs.....	5
I.2.2.1 Les hacheurs réversibles .....	6
I.2.2.2 Les hacheurs non réversibles.....	6
I.3 Avantage de convertisseur BOOST .....	9
I.4 Convertisseur Z-source.....	10
I.4.1 Généralités .....	10
I.4.2 Types de commandes.....	11
I.4.2.1. Méthode Indirecte .....	11
I.4.2.2. Méthode Directe .....	12
I.5 Onduleur "Z-source" et Hacheur "Z-source" .....	12
I.6 Système avec convertisseur Z-source.....	13
I.7 Conclusion .....	14

## **II. Modélisation des éléments du système pompage photovoltaïque**

II.1 Introduction.....	15
II.2 Pompage photovoltaïque.....	15
II.2.1 Pompage au fil du soleil.....	15
II.2.2 Pompage avec batterie .....	16
II.2.3 Configuration typique d'un système de pompage photovoltaïque .....	17
II.2.3.1 Systèmes de petite puissance (50-400W) .....	17

II.2.3.2 Systèmes de moyenne puissance (400-1500 W).....	19
II.2.4 Description des différents composants d'un système photovoltaïque .....	20
II.2.4.1 Générateur solaire .....	20
II.2.4.2 Cellule photovoltaïque .....	21
II.2.4.3 Conversion du rayonnement solaire par effet photovoltaïque .....	22
II.2.4.4 Caractéristiques principales du générateur photovoltaïque .....	23
II.2.4.5 Technologie des cellules photovoltaïque.....	23
II.2.4.6 Regroupement des cellules .....	24
II.2.4.7 Avantages et inconvénients du système photovoltaïque .....	26
II.2.4.8 Stockage de l'énergie électrique.....	27
II.3 Structure du système de pompage .....	28
II.4 Conclusion .....	29
 <b>III. Stratégie de la commande MPPT d'un hacheur boost &amp; Z-source</b>	
III.1 Introduction.....	31
III.2 Recherche du point de puissance maximale (MPPT).....	31
III.2.1 Algorithmes de contrôle MPPT .....	31
III.2.1.1 Algorithme de perturbation et observation.....	32
III.3 Simulation de la commande MPPT.....	34
III.3.1 MPPT en utilisant un hacheur boost conventionnel.....	34
III.3.1.1 Interprétations des résultats .....	38
III.3.2 MPPT en utilisant un hacheur Z-source .....	38
III.3.2.1 Interprétations des résultats .....	42
III.3.3 Comparaison et discussion des résultats.....	42
III.4 Conclusion .....	44
Conclusion générale.....	46
Bibliographie.....	48
Annexes.....	52

# Table des figures

I. 1 Schéma des convertisseurs conventionnels : Boost, Buck et Buck-Boost. _____	5
I. 2 Schéma de principe d'un hacheur réversible en tension _____	6
I. 3 Schéma de principe d'un hacheur réversible en courant et en tension _____	6
I. 4 schéma réel du Convertisseur buck _____	7
I. 5 schéma d'un convertisseur dévolteur-survolteur _____	7
I. 6 Convertisseur survolteur (boost) _____	8
I. 7 schéma simplifié de hacheur boost en deux phases _____	8
I. 8 Méthode de commande indirecte. _____	11
I. 9 Méthode de commande directe. _____	11
I. 10 Onduleur à ZS. _____	12
I. 11 Hacheur à ZS _____	12
I. 12 Architecture du convertisseur Z-source _____	13
II. 1 Schéma de principe de pompage au fil du soleil _____	16
II. 2 Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil. _____	16
II. 3 Schéma de principe de pompage avec stockage. _____	17
II. 4 Systèmes de petite puissance. _____	18
II. 5 Systèmes de moyenne puissance. _____	19
II. 6 Spectre de rayonnement solaire _____	20
II. 7 Bilan radiatif de la Terre _____	21
II. 8 Schéma d'une cellule solaire à jonction P-N standard. _____	21
II. 9 Principe de l'effet photovoltaïque. _____	22
II. 10 Caractéristique d'une cellule Photovoltaïque. _____	23
II. 11 Caractéristique courant tension de $N_s$ cellule en série. _____	24
II. 12 Caractéristique courant tension de ( $N_p$ ) cellules en parallèles. _____	25
II. 13 Schéma d'association mixte des modules. _____	25
II. 14 Caractéristique résultante du regroupement mixte. _____	26
II. 15 Structure d'un système de pompage photovoltaïque. _____	28

<b>III. 1</b>	Schéma de principe de la commande MPPT. _____	31
<b>III. 2</b>	Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O. _____	32
<b>III. 3</b>	Organigramme de la méthode P&O. _____	33
<b>III. 4</b>	Schéma bloc de Simulation de l'hacheur boost conventionnel. _____	34
<b>III. 5</b>	Profil d'irradiation. _____	35
<b>III. 6</b>	Rapport cyclique. _____	35
<b>III. 7</b>	Puissance du GPV. _____	36
<b>III. 8</b>	Courant du GPV. _____	36
<b>III. 9</b>	Tension du GPV. _____	36
<b>III. 10</b>	Tension de charge _____	37
<b>III. 11</b>	Puissance de charge _____	37
<b>III. 12</b>	Courant de charge _____	37
<b>III. 13</b>	Schéma bloc de Simulation de l'hacheur Z-source _____	38
<b>III. 14</b>	Profil d'irradiation. _____	39
<b>III. 15</b>	Rapport cyclique _____	39
<b>III. 16</b>	Puissance du GPV _____	40
<b>III. 17</b>	Courant du GPV _____	40
<b>III. 18</b>	Tension du GPV _____	40
<b>III. 19</b>	Tension de charge _____	41
<b>III. 20</b>	Puissance de charge _____	41
<b>III. 21</b>	Courant de charge _____	42
<b>III. 22</b>	Comparaison du rapport cyclique entre le hacheur boost et le hacheur Z-source. ___	43

# Liste des Tableaux

<b>I.1:</b> Tableau De Rapports De Transformation Des Principaux Convertisseurs DC-DC.....	9
<b>I.2:</b> Tableau De Rendement De Quelques Convertisseurs DC-DC.....	9
<b>III.1:</b> Tableau De Principe De l’algorithme P&O.....	32

# Symboles et Acronymes

**N<sub>s</sub>** : Le nombre de cellules connectées en série.

**N<sub>p</sub>** : Le nombre de cellules connectées en parallèle

**AC** : Courant Alternatif

**DC** : Courant Continu

**MCC** : Moteur à courant continu

**MPPT**: Maximum Power Point Tracking

**ZSC**: Convertisseur Z-Source

**PV**: Photovoltaïque

**GPV**: Générateur Photovoltaïque

**DTC** : Direct Torque contrôle-Contrôle direct de couple

**P&O** : Perturbation et Observation

**PM** : Point de Puissance Maximale

---

# Introduction générale

---

## Introduction générale

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires 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. 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. Cette technologie est en développement et caractérisée par un coût graduellement en baisse. La première génération des systèmes de pompage solaires utilisaient des moteurs à courant continu à aimant permanent, surtout pour les applications à des basses et moyennes hauteurs.

L'énergie produite par les systèmes photovoltaïques est très faible, mais le besoin de fournir des solutions d'électronique de puissance innovantes se pose toujours lorsque l'on veut optimiser l'énergie extraite de cette source. Les convertisseurs de puissance occupent une place de plus en plus importante dans le processus de production d'énergie, notamment parmi les éléments de la chaîne de conversion photovoltaïque qui imposent certaines limitations c'est l'hacheur. La topologie de convertisseur Z-source nouvellement développée est bien adaptée à la puissance produite par les systèmes photovoltaïques et à améliorer la qualité de l'énergie produite et pour des performances plus élevées.

Afin d'accomplir au mieux cette étude, le présent mémoire est structuré en trois principaux chapitres.

Dans le premier chapitre, une recherche bibliographique sur les convertisseurs de puissance comme les convertisseurs DC-DC qui sont des dispositifs utilisés chaque fois que nous voulons changer une alimentation électrique à courant continu d'un niveau de tension à un autre, son objectif principal est de modifier l'énergie en courant continu à partir d'un niveau particulier à d'autres niveaux tout en minimisant les pertes et une recherche bibliographique sur les convertisseur Z-source a été faite.

Le deuxième chapitre est dédié à la Modélisation des éléments du système pompage photovoltaïque y compris la cellule photovoltaïque, le générateur photovoltaïque, et une compréhension générale du pompage photovoltaïque, ainsi que les avantages et inconvénients du système photovoltaïque.

Ensuite, dans le troisième chapitre, nous exposerons l'algorithme de maximisation de puissance MPPT avec la méthode de perturbation et d'observation (P&O), et on a proposé et évalué une stratégie de commande pour maximiser la production d'énergie du système de pompage photovoltaïque, y compris la simulation de la commande MPPT d'un convertisseur de puissance (hacheur boost & Z-source).

# Chapitre I

---

Généralités sur les convertisseurs de  
puissance  
(Hacheur boost & convertisseur Z-  
source)

---

# Chapitre I

## Généralités sur les convertisseurs de puissance

### (Hacheur boost & convertisseur Z-source)

#### I.1 Introduction

Les systèmes chargés de manipuler l'énergie électrique sont les convertisseurs statiques qui permettent d'adapter de manière réversible l'énergie entre le réseau et la charge. Ces transformations apparaissent sous quatre formes les quelles sont associés quatre types de convertisseurs : les redresseurs, les hacheurs, les onduleurs et les gradateurs, les fonctions de base peuvent être utilisées seules ou associées entre elles pour adapter les modes de conversion aux besoins de l'utilisateur. [1] . Nous allons voir dans cette partie deux types de convertisseurs statiques.

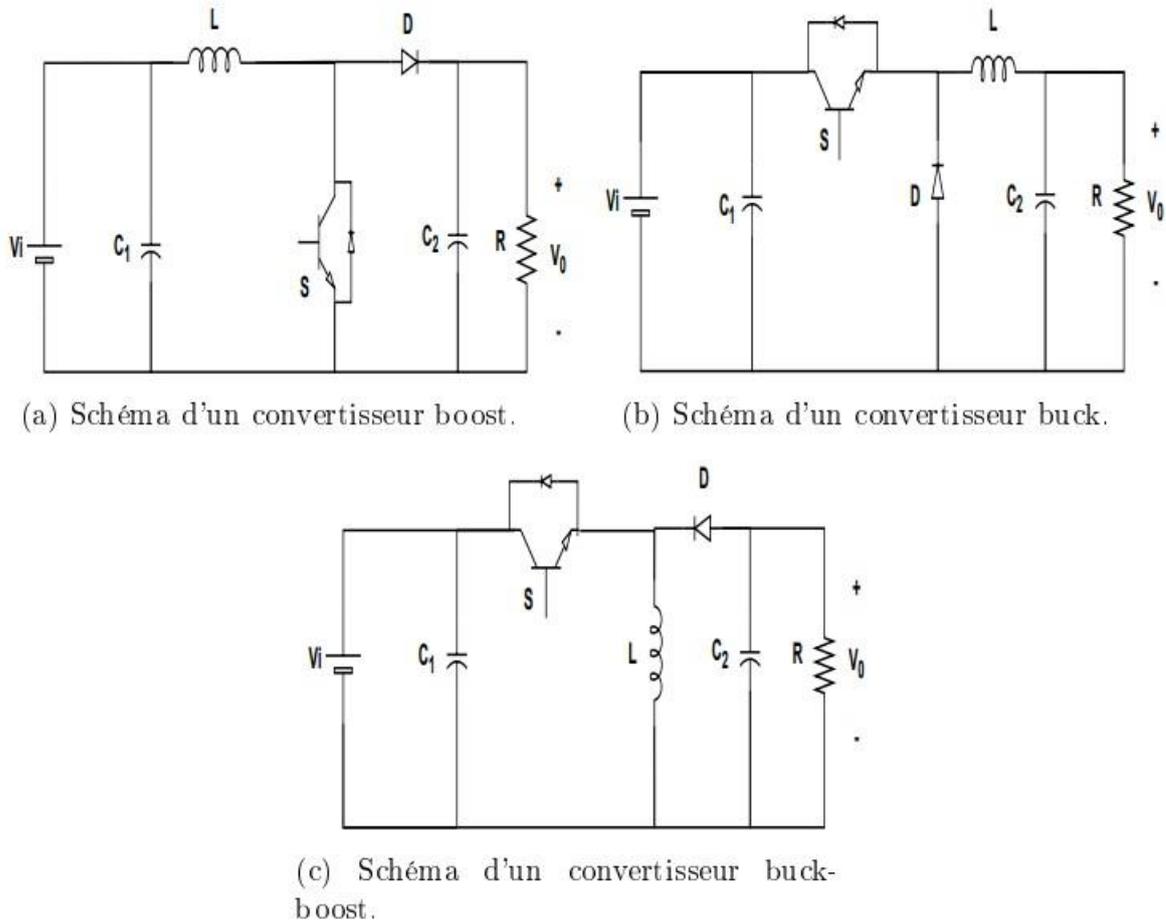
#### I.2 Convertisseur DC-DC (les hacheurs) :

Les convertisseurs DC-DC, ou hacheurs, sont des dispositifs électroniques qui permettent de convertir une tension continue en une autre tension continue de valeur différente.

Les hacheurs conventionnels, tels que le hacheur buck, boost et buck-boost, sont largement utilisés dans de nombreuses applications électroniques, telles que l'alimentation de circuits intégrés, l'énergie solaire et éolienne, les systèmes de conversion d'énergie, les véhicules électriques. Le convertisseur Boost permet d'augmenter la tension d'entrée une tension de sortie plus élevée. Le convertisseur Buck permet de réduire la tension d'entrée une tension de sortie inférieure. Le convertisseur Buck-Boost permet de convertir la tension d'entrée une tension de sortie variable. [2]

Ils peuvent abaisser ou augmenter la tension d'entrée selon les besoins.

Les figures ci-dessous représentent les convertisseurs conventionnels les plus couramment utilisés.



**Figure I.1.** Schéma des convertisseurs conventionnels : Boost, Buck et Buck-Boost. [3]

### I.2.1 Domaines d'utilisation des hacheurs

Un des gros domaines d'utilisation des hacheurs est la variation de vitesse du moteur à courant continu (MCC), Ils équipent par exemple la majorité des engins de moyenne traction, tels que ceux utilisés pour le métro. Leur utilisation permet le contrôle de la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

On trouve aussi des hacheurs dans tous les équipements destinés à l'utilisation de l'énergie éolienne ou solaire. Ils permettent de rendre constante une tension d'entrée très versatile.

Les hacheurs sont également utilisés dans l'alimentation des moteurs pas à pas. [4]

### I.2.2 Types des hacheurs

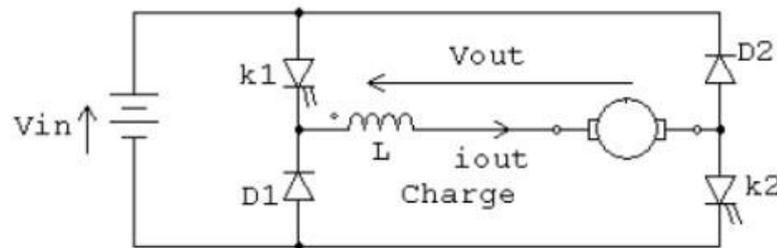
Du point de vue réversibilité des grandeurs de sortie, on distingue deux catégories des hacheurs : *Réversibles* et *irréversibles*. La réversibilité permet d'apporter certains avantages aux hacheurs. On cite par exemple, l'inversion du sens de rotation des moteurs électriques, le freinage par récupération, rechargement des batteries par récupération. etc. [5]

### I.2.2.1 Les hacheurs réversibles :

Les hacheurs réversibles permettent l'inversion du courant ou de la tension. Ce type de comportement se rencontre usuellement dans les systèmes d'entraînements électriques.

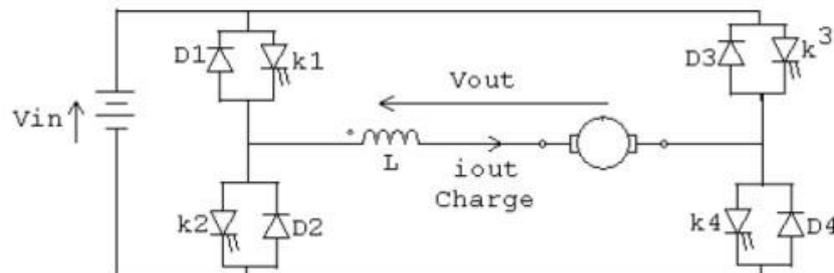
Ainsi, un moteur en sortie d'un hacheur représente une charge. Cependant, si on veut réaliser un freinage, le moteur va devenir une génératrice, ce qui va entraîner un renvoi d'énergie à la source (mieux qu'un simple freinage mécanique). [5] Dans cette catégorie, on distingue trois types :

- a) **hacheur réversible en tension (deux quadrants)** : C'est uniquement la tension appliquée à la charge qui peut prendre des valeurs positives ou négatives.



**Figure I.2:** Schéma de principe d'un hacheur réversible en tension [5]

- b) **hacheur réversible en courant (deux quadrants)** : C'est uniquement le courant de charge qui peut prendre des valeurs positives ou négatives.



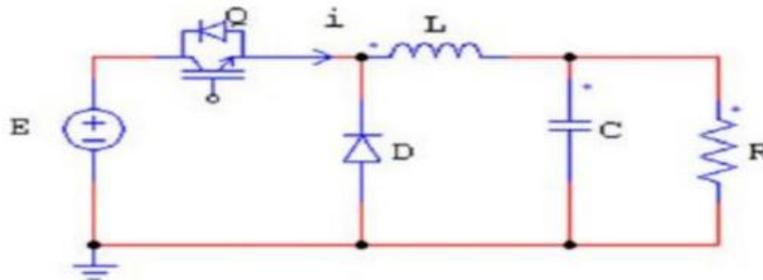
**Figure I.3 :** Schéma de principe d'un hacheur réversible en courant et en tension [5]

### I.2.2.2 Les hacheurs non réversibles :

Les hacheurs non réversibles permettent un transfert unidirectionnel de l'énergie électrique (uniquement de la source vers la charge). [5] Dans cette catégorie et selon le type des sources de l'entrée et de la sortie, on distingue deux sous-catégories :

a) **Le hacheur dévolteur**

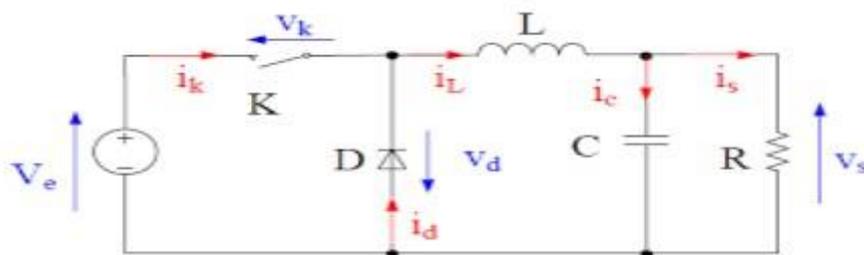
Le convertisseur dévolteur *est* également connu sous le nom d'hacheur buck ou hacheur série. La figure I.5 présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure. [6]



**Figure I.4** : schéma réel du Convertisseur buck [6]

b) **Hacheur dévolteur-survolteur (buck-boost) :**

La deuxième topologie de base du DC/DC est donnée par la figure I.5. Avec ce dispositif, nous pouvons augmenter ou diminuer la tension, en fonction du mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Tandis que, lorsque le thyristor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur se met sur la position (off) l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode. [7]

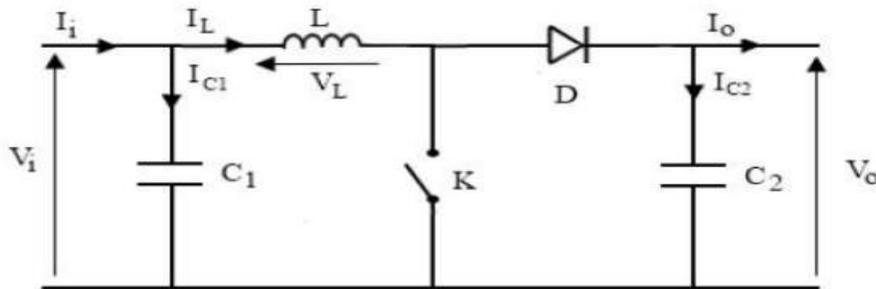


**Figure I.5** Schéma d'un convertisseur dévolteur-survolteur [6].

Alors. Nous citons dans la partie suivante les types qui servent à notre étude.

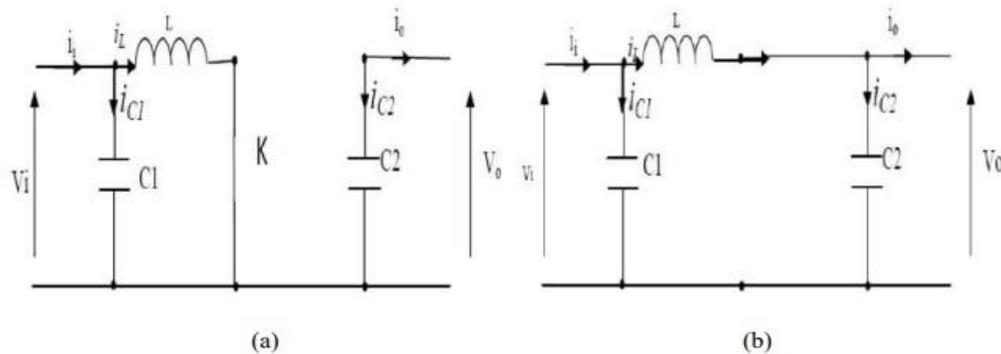
c) *Le hacheur survolteur*

Le hacheur survolteur est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « **boost** » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure I.6. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure. [6]



**Figure I.6 :** Convertisseur survolteur (boost) [6]

En appliquant les lois de Kirchhoff à chacune des topologies possibles pour obtenir les équations différentielles qui représentent le convertisseur boost.



**Figure.I.7** Schéma simplifié d'hacheur boost en deux phases [6]

1) Pour la première période (a), k est fermé :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t)$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t)$$

$$V_L = L \frac{dV_L(t)}{dt} = V_i(t)$$

2) Pour la deuxième période  $T_s$  (b),  $k$  est ouvert :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_l(t)$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -I_0(t)$$

$$V_L = L \frac{dV_L(t)}{dt} = V_i(t)$$

Le convertisseur d'énergie photovoltaïque choisi est un hacheur de type survolteur ou dévolteur ou dévolteur- survolteur selon les applications de la charge. Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. [7]

Convertisseur	Rapport de transformation en fonction de $\alpha$	Isolement galvanique
Buck	$\alpha$	Non
Boost	$1/1-\alpha$	Non
Buck-Boost	$-\alpha / (1-\alpha)$	Non

**Tableau I.1 :** Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC [8]

Convertisseur	Rendement du convertisseur (%)
Buck	93
Boost	92
Buck-Boost	92

**Tableau I.2 :** Rendement des quelques convertisseurs DC-DC [9]

### **I.3 Avantage de convertisseur BOOST**

Malgré le rendement élevé du convertisseur Buck dans les systèmes avec des Sources de puissance conventionnelles, le convertisseur Boost peut être plus approprié aux systèmes photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT) puisque le convertisseur fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de Puissance que possible à partir des cellules solaires.

Par conséquent le rendement énergétique du convertisseur boost peut être plus grand que le convertisseur buck. Le Convertisseur Boost est généralement employé pour obtenir une tension plus élevée de sortie, tandis que le convertisseur buck est employé pour abaisser la tension de Sortie [10].

### **I.4 Convertisseur Z-source**

#### **I.4.1 Généralités**

Le convertisseur Z-source (ZSC) est un concept nouvellement proposé de conversion de puissance qui est très prometteur dans les secteurs de la puissance conditionnant particulièrement dans des sources énergétiques alternatives.

Les convertisseurs "Z-source" sont des topologies de convertisseurs récents qui peuvent effectuer deux fonctions à la fois l'amplification et l'abaissement comme une seule unité [11]. Une caractéristique unique des convertisseurs "Z-source" est l'état "Shoot-Through" par lequel les deux interrupteurs à semiconducteurs de la même branche de phase peuvent être activés simultanément. Par conséquent, aucun temps mort n'est nécessaire et la distorsion de sortie est fortement réduite et donc la fiabilité est considérablement améliorée. Cette fonctionnalité n'est pas disponible dans les sources de tension et de courant traditionnelles. Les convertisseurs "Z-source" sont principalement appliqués pour les charges qui exigent un gain à haute tension tels que les entraînements des moteurs et comme une unité de conditionnement de puissance pour les sources d'énergie renouvelables comme les cellules solaires, les piles à combustible, etc pour faire correspondre les différences de tension de la source d'entrée [12].

Il est à noter que cette augmentation dans les composants passifs avec des modifications appropriées peut améliorer la performance de ces types de convertisseurs. L'accroissement topologique a été en termes d'ajout ou de la réduction de la composante passif, l'inclusion

des interrupteurs à semiconducteurs supplémentaires, la modification ou l'inclusion de sources de courant continu et aussi des changements de schémas de modulation, etc [12]. La possibilité d'inversion de faibles tensions est également fournie pour les applications qui ont besoin de tensions alternatives faibles [13]. Il est également à noter que cette croissance topologique a conduit à l'amélioration des caractéristiques de sortie fiables pour diverses opérations. Il y a aussi des cas où une topologie spécifique est modifiée pour une application unique.

### I.4.2 Types de commandes

La commande de la tension du bus continu du convertisseur ZS se fait en suivant deux principales stratégies de commande : la méthode directe et la méthode indirecte [14]. Ces deux méthodes de commande présentent une bonne réponse transitoire en termes de suivi de référence et de rejet de perturbation.

#### I.4.2.1 Méthode Indirecte

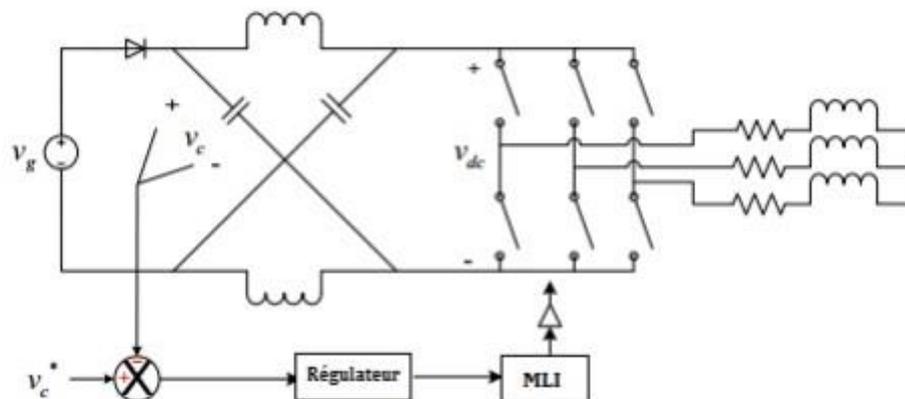
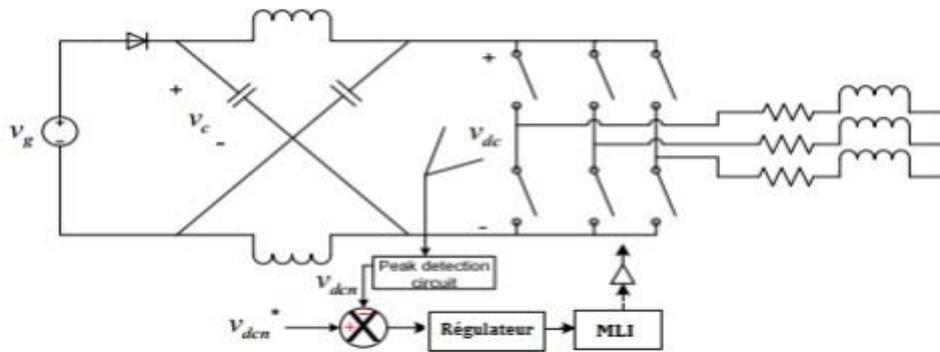


Figure 1.8 Méthode de commande indirecte. [14]

Cette méthode consiste à commander la tension du bus continu  $V_{dc}$  moyennant la tension de la capacité du réseau d'impédances  $Z_S$  (Figure 1.8). La tension moyenne du condensateur est gardée constante en utilisant une compensation.

### I.4.2.2 Méthode Directe

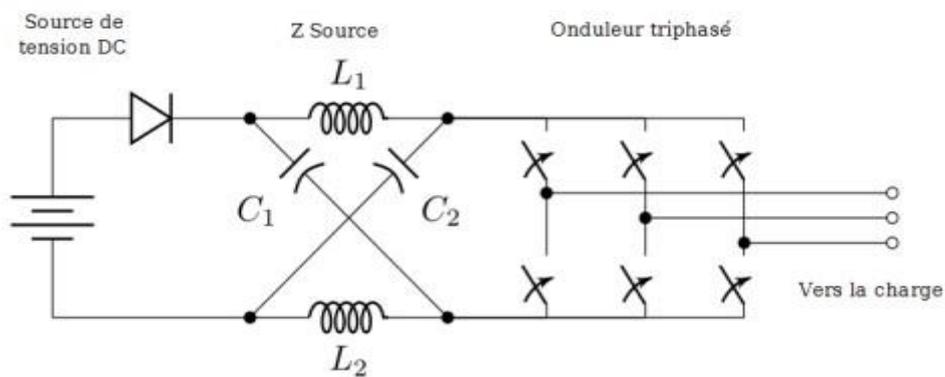


**Figure 1.9** Méthode de commande directe. [14]

Cette méthode est basée sur la mesure directe de la tension  $V_{dc}$  pour la garder constante. Le principe de cette méthode est montré sur la Figure (1.9). L'ajout d'un circuit de détection de pic (Peak Détection Circuit) est nécessaire pour la mesure directe à cause de la nature pulsative de la tension  $V_{dc}$ .

### I.5 Onduleur "Z-source" et Hacheur "Z-source"

Généralement quand on parle d'un convertisseur "Z-source", on veut dire un onduleur "Z-source", car le but de la première utilisation c'était de booster la tension d'entrée d'un onduleur tout en éliminant l'étage du convertisseur DC/DC (Figure 1.10) [14]



**Figure 1.10** Onduleur à ZS. [14]

Cependant, il suffit de remplacer les bras de l'onduleur par un seul interrupteur parallèle pour avoir une structure d'un hacheur Boost ou Buck en même temps : C'est l'Hacheur « Z-source" (Figure 1.11) [14].

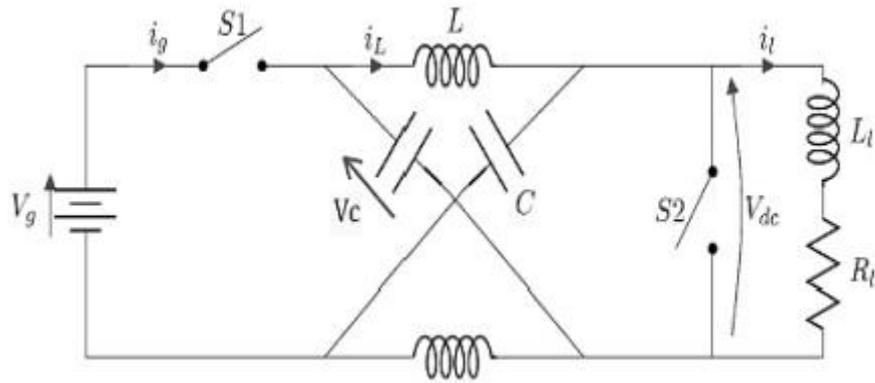


Figure 1.11 Hacheur à ZS [14]

### I.6 Système avec convertisseur Z-source

Plusieurs études ont été faites pour remplacer les convertisseurs classiques par des convertisseurs Z-source dans plusieurs domaines grâce aux nombreux avantages qu'ils offrent. L'architecture générale du système est présentée à la Figure I.12. [14].

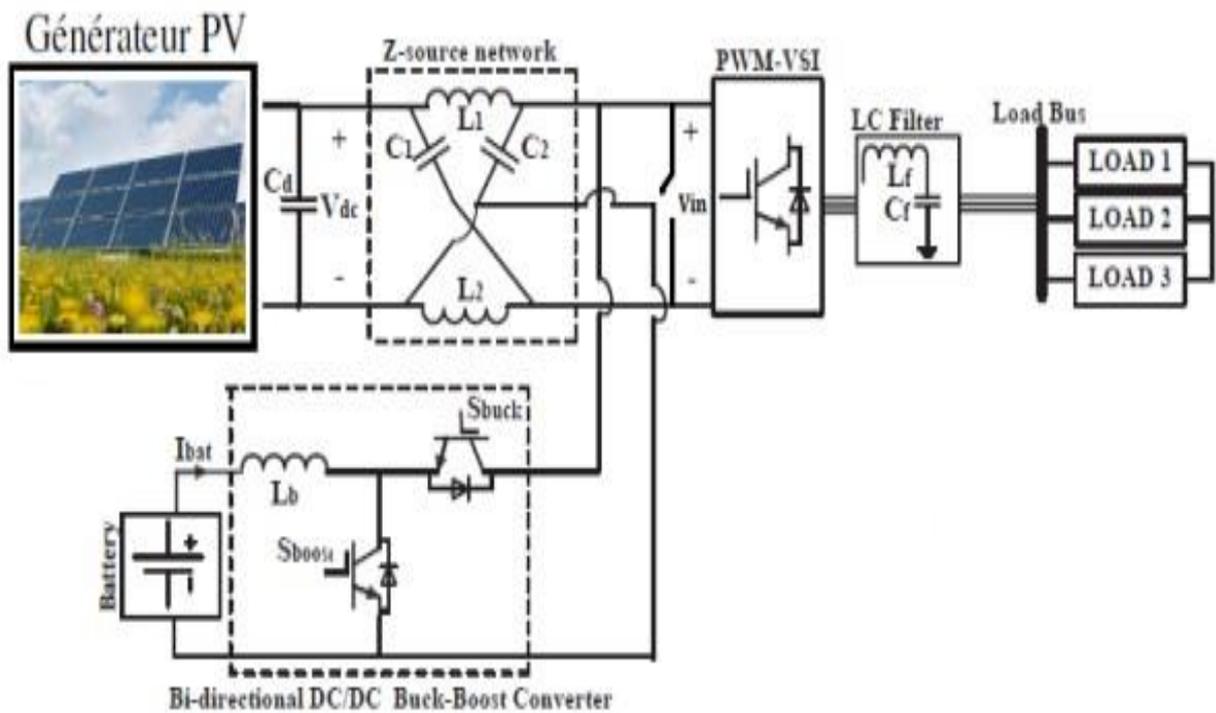


Figure I.12 Architecture du convertisseur Z-source [14]

**I.7 Conclusion**

Dans ce chapitre on a présenté les différents types des convertisseurs DC-DC. Comme le hacheur dévolteur, survolteur et le mixte (dévolteur -survolteur) et leurs avantages ainsi nous avons présenté des généralités sur les convertisseurs Z-source, et leur commande. Cette croissance durable de ces derniers a attiré des chercheurs d'introduire certains modèles uniques de convertisseurs Z- source.

# Chapitre II

---

## Modélisation des éléments du système pompage photovoltaïque

---

# Chapitre II

## Modélisation des éléments du système pompage photovoltaïque

### II.1 Introduction

Pour concevoir un système de pompage photovoltaïque, il existe une multitude de choix en ce qui concerne les sources d'énergie comme les panneaux photovoltaïques, des batteries, des super-condensateurs et des volants d'inertie, etc...

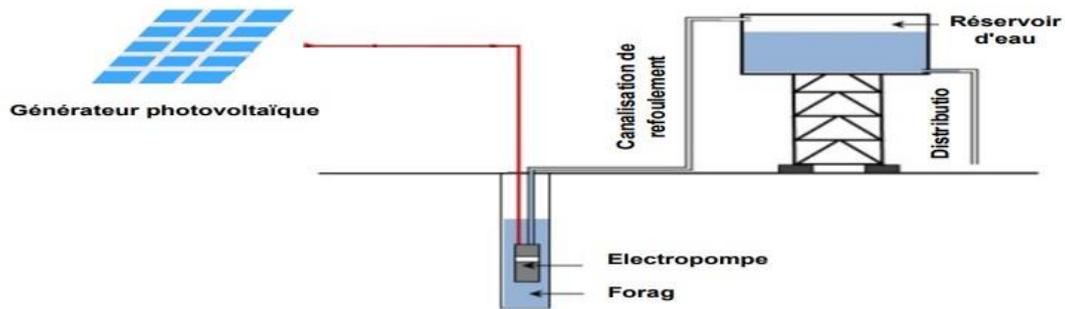
Pour choisir les sources appropriées, il faut d'abord choisir l'architecture de base du flux d'énergie, en ce qui concerne la réversibilité de l'énergie électrique et la stabilité du système, par exemple l'utilisation d'un système de panneaux photovoltaïques avec des batteries de stockage. En outre, la tension de sortie de ces sources est relativement faible et, en général, une tension élevée du bus continu est nécessaire. Donc, les convertisseurs Z-source à gain élevé jouent un rôle important dans l'interface entre les panneaux photovoltaïques et le bus continu. Ces convertisseurs ont de meilleures caractéristiques que les convertisseurs conventionnels en matière de rendement et de gain. Ainsi, dans ce chapitre, nous donnons un aperçu sur les sources d'énergie comme les panneaux photovoltaïques, la batterie, etc. Ensuite, nous allons faire une petite recherche bibliographique sur les différentes architectures des panneaux photovoltaïques ainsi que les différentes structures des convertisseurs Z-source.

### II.2 Pompage photovoltaïque

Il existe deux techniques possibles dans les systèmes de pompage photovoltaïque : le pompage au fil du soleil et le pompage avec stockage d'énergie.

#### II.2.1 Pompage au fil du soleil

La technique de stockage d'énergie dans les systèmes de pompage photovoltaïque s'effectue par voie hydraulique. L'eau est pompée lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement vers un réservoir situé au-dessus du sol. Par la suite, elle est distribuée par gravité selon les besoins. En revanche, le pompage au fil du soleil permet d'obtenir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système avec batterie [15], comme le montre la figure ci-dessous :



**Figure II.1** Schéma de principe de pompage au fil du soleil [15]

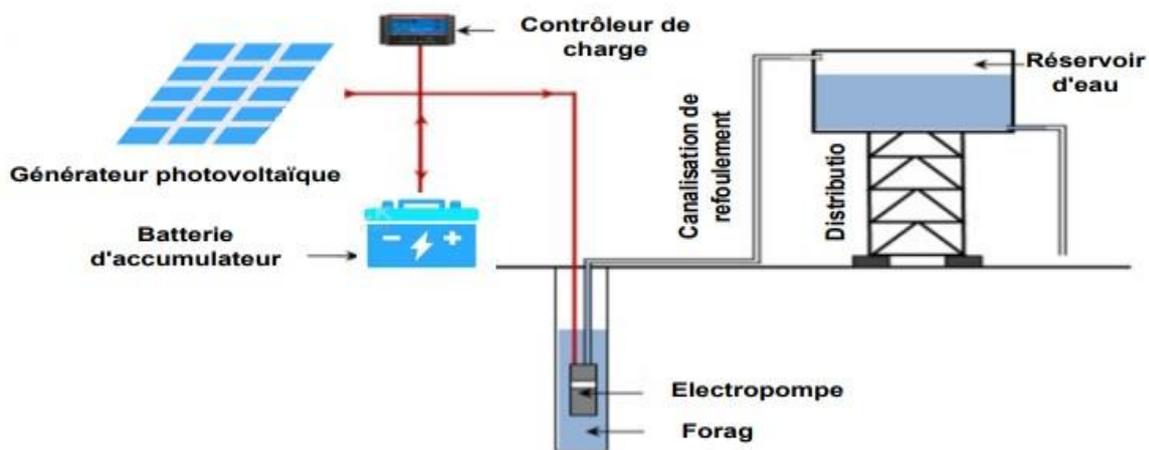
Le fonctionnement d'une installation de ce type est relativement simplifié. Les panneaux photovoltaïques alimentent une pompe (de surface ou immergée) assistée par un régulateur contrôleur, qui peut être intégré à la pompe selon le fabricant. Lorsque les panneaux sont exposés au soleil, ils approvisionnent l'eau pour le pompage. Dans le cas du pompage au fil du soleil, un réservoir est utilisé pour stocker l'eau jusqu'à son utilisation ultérieure. Cette solution est moins coûteuse, mais les pompes utilisées ne produisent pas un débit constant et ne fonctionnent pas en dessous d'un certain niveau d'éclairement, comme au début et à la fin de la journée, comme indiqué sur la figure (II.2). Leur rendement est également plus faible en dehors de la puissance nominale de fonctionnement, d'où la nécessité d'installer un adaptateur de charge (convertisseur) [15].



**Figure II.2** Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil. [15]

### II.2.2 Pompage avec batterie

Une autre approche pour la technique de pompage photovoltaïque est d'utiliser un stockage d'énergie, comme illustré dans la figure (II.3), en utilisant des batteries. Ces batteries permettent de stocker l'énergie produite par les cellules photovoltaïques pendant les périodes d'ensoleillement, pour la restituer ultérieurement lors du pompage de l'eau selon les besoins des utilisateurs. Cette méthode permet d'obtenir un débit de pompage à la demande, lorsque l'eau est nécessaire [15].



**Figure II.3** Schéma de principe de pompage avec stockage. [15]

### II.2.3 Configuration typique d'un système de pompage photovoltaïque

Pour obtenir des performances optimales d'un système de pompage photovoltaïque, il est important que tous les éléments soient conçus pour travailler ensemble efficacement. Selon les besoins de l'application, différentes solutions peuvent être envisagées pour pomper un certain volume d'eau à une certaine hauteur, en fonction des plages de puissance requises [16].

Bien que les pompes puissent être installées en surface ou flottantes, l'option la plus courante consiste en une pompe immergée dans un puits de forage. La configuration d'un système de pompage photovoltaïque dépend du type de générateur photovoltaïque, du type de pompe et de moteur, ainsi que du type de conditionnement de puissance [16].

Il existe différents types de systèmes de pompage photovoltaïques, qui se distinguent par leurs éléments constitutifs :

#### II.2.3.1 Systèmes de petite puissance (50-400W)

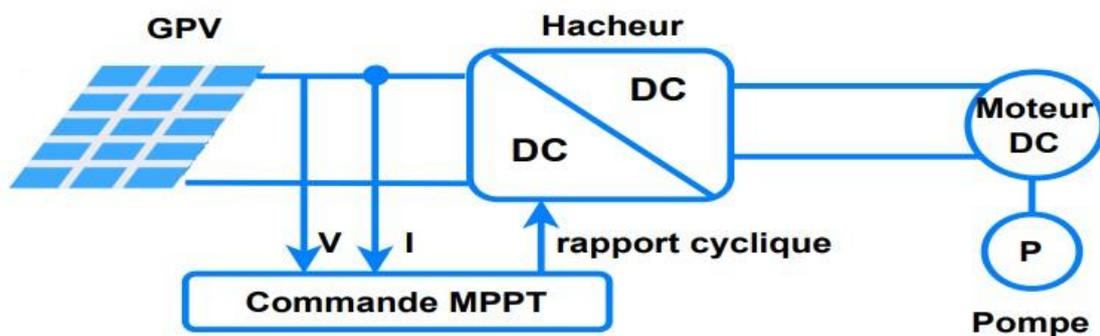
Ce système utilise principalement un moteur à courant continu pour entraîner une pompe centrifuge ou à déplacement positif. Pour améliorer son adaptation, un convertisseur DC/DC est intercalé entre le générateur PV et le moteur/pompe. Cette configuration est généralement utilisée pour pomper des volumes d'eau pouvant atteindre 150 m<sup>3</sup>/jour. [16]

Les principaux composants de ces systèmes sont :

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

La configuration de système de pompage photovoltaïque à moteur courant continu est illustrée dans la figure (II.4). Elle se compose d'un moteur DC et d'une pompe. Les moteurs à courant continu peuvent être classés en fonction de leur champ d'excitation : excitation séparée (aimant permanent), en série et en dérivation. Étant donné que les modules photovoltaïques produisent du courant continu, l'utilisation de moteurs DC permet d'éviter l'utilisation de convertisseurs de puissance.

La figure (II.4) présente le schéma simplifié d'un système de pompage utilisant un moteur à courant continu. Le couplage est direct (sans stockage électrique), avec une optimisation du générateur par un hacheur adaptateur de puissance commandée par son rapport cyclique. Cette configuration nécessite une électronique relativement simple. Cependant, l'inconvénient des moteurs à courant continu est la nécessité d'un entretien régulier. [16]



**Figure II.4** Systèmes de petite puissance. [16]

### II.2.3.2 Systèmes de moyenne puissance (400-1500 W)

Les systèmes de pompage photovoltaïques de ce type sont principalement composés d'une pompe centrifuge immergée entraînée par un moteur à induction à courant alternatif via un convertisseur DC/AC triphasé travaillant à fréquence variable. Pour l'adaptation d'impédance et la recherche du point de puissance maximale (MPPT), un convertisseur DC/DC est généralement intercalé entre le générateur PV et le convertisseur DC/AC.

Ces systèmes sont largement utilisés depuis les premières installations de pompage photovoltaïque en raison de leur grande fiabilité. Les volumes d'eau pouvant être pompés varient entre 150 et 1500 m<sup>3</sup>/jour [15]. (Figure II-5). Les éléments clés de ces systèmes comprennent :

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

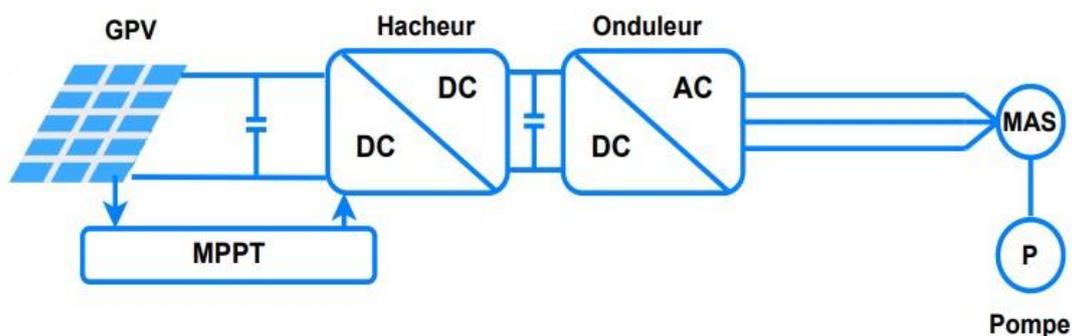


Figure II.5 Systèmes de moyenne puissance. [15]

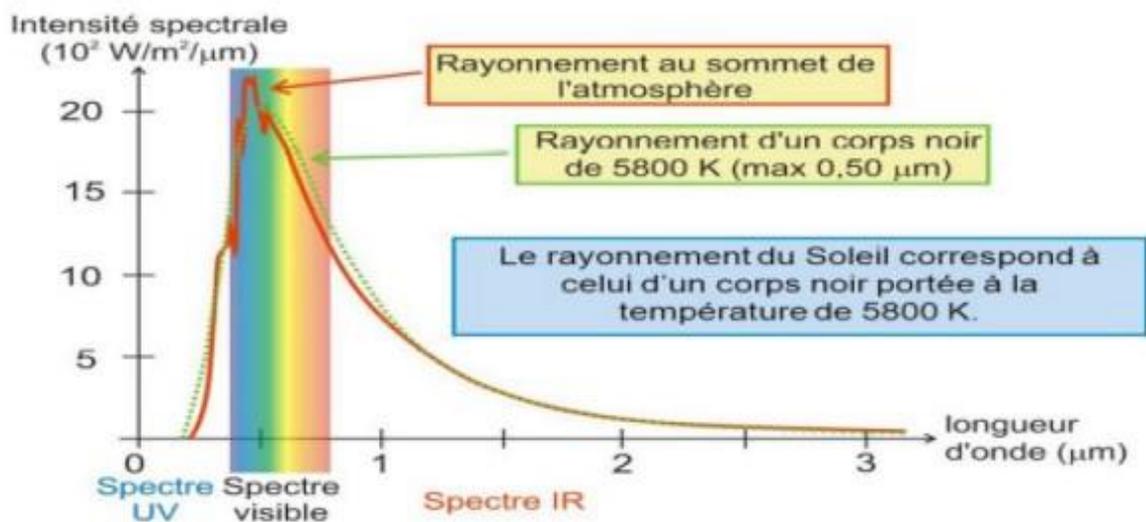
## II.2.4 Description des différents composants d'un système photovoltaïque

On a choisi de décrire les différents composants d'un système de pompage photovoltaïque en se basant sur un système de moyenne puissance, en raison de sa grande fiabilité et de son utilisation répandue depuis les premières installations.

### II.2.4.1 Générateur solaire

- **Rayonnement solaire :**

Le rayonnement solaire correspond à l'ensemble des radiations électromagnétiques émises par le soleil, comprenant les rayons ultraviolets, la lumière visible, les ondes radio et les rayons cosmiques [17].



**Figure II.6** Spectre de rayonnement solaire [17]

Le spectre solaire correspond à la distribution de l'énergie des différentes longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique émis par le soleil. La lumière visible représente 46% de l'énergie totale émise, tandis que 49% se situe dans l'infrarouge, au-delà du rouge visible, ce qui correspond à la sensation de chaleur que nous ressentons. Les radiations ultraviolettes représentent le reste du rayonnement solaire et incluent toutes les longueurs d'onde plus courtes que la limite violette du spectre visible. [16] [18]

- 1 : Puissance émise par le soleil : 63 500 kW/m<sup>2</sup>.
- 2 : Constante solaire : 1 370 W/m<sup>2</sup>.
- 3 : Rayonnement réfléchi.
- 4 : Rayonnement absorbé et diffusé.
- 5 : Rayonnement solaire à la surface de la Terre (max : 1000W/m<sup>2</sup>).



Figure II.7 Bilan radiatif de la Terre [18]

#### II.2.4.2 Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est composée de semi-conducteurs assemblés en deux couches, une dopée positivement (P) et l'autre négativement (N), qui forment une jonction P-N à leur interface. En présence de lumière, les électrons de la bande de valence reçoivent une énergie qui leur permet de passer vers la bande de conduction. Ils laissent derrière eux des "trous" qui agissent comme des charges positives. Cette réaction crée une différence de potentiel qui engendre la circulation d'un courant électrique continu [19].

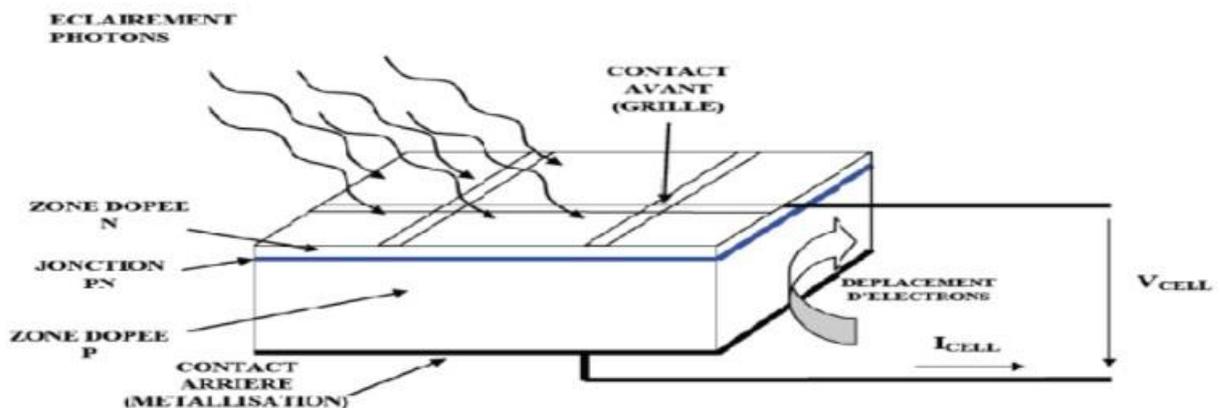


Figure II.8 Schéma d'une cellule solaire à jonction P-N standard [19]

### II.2.4.3 Conversion du rayonnement solaire par effet photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques convertissent directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité à travers un phénomène connu sous le nom « effet photovoltaïque ». Ce processus résulte de l'interaction entre les photons du rayonnement solaire et les matériaux semi-conducteurs de la cellule.

Lorsqu'un photon heurte une cellule PV, son énergie peut être transférée à un électron dans le semi-conducteur de la cellule, ce qui lui permet de passer de la bande de valence à la bande de conduction, créant ainsi un trou.

Cette paire électron-trou donne lieu à une différence de potentiel et crée un courant dans un circuit électrique, comme illustré dans la (figure II-9) ci-dessous.

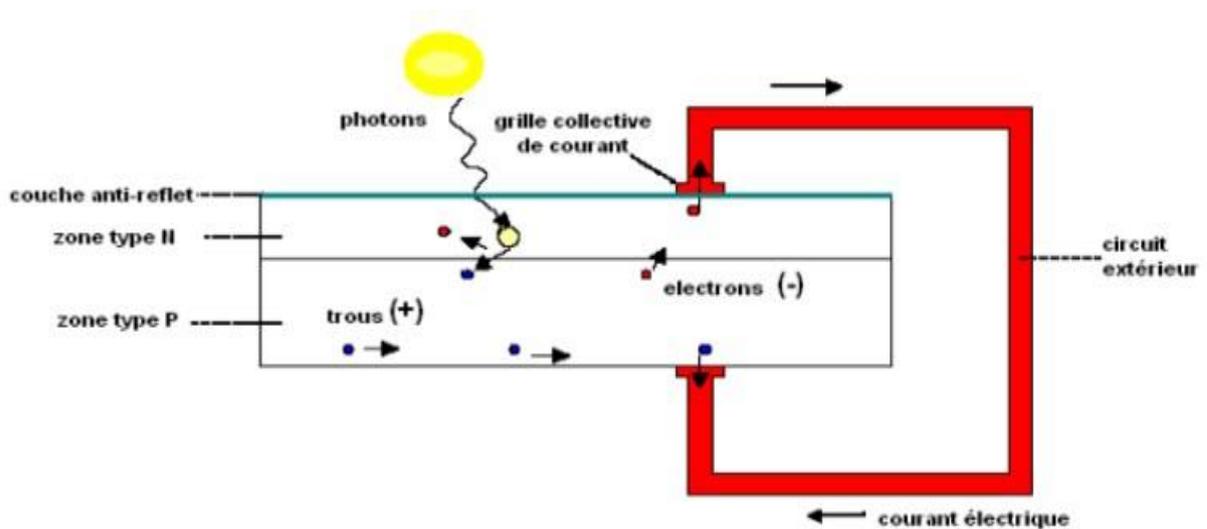


Figure II.9 Principe de l'effet photovoltaïque. [20]

Une cellule photovoltaïque basique est composée de deux matériaux semi-conducteurs dopés, chacun ayant la capacité de conduire soit les charges négatives, soit les charges positives. L'objectif de la structure photovoltaïque est de créer un champ électrique interne permanent, générant ainsi une différence de potentiel entre les deux couches de la cellule. Cette différence de potentiel permet d'établir un courant électrique en connectant les bornes de la jonction à un circuit extérieur. [20]

#### II.2.4.4 Caractéristiques principales du générateur photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est une variante de la diode à jonction PN. En l'absence de lumière, elle se comporte comme une photodiode classique, nécessitant une alimentation externe, avec une caractéristique similaire à celle d'une diode. En revanche, en présence de lumière, elle agit comme un générateur de courant continu (DC). [19]

La région du quadrant où se situe la plage de puissance utile est communément inversée pour faciliter la lecture du comportement des générateurs photovoltaïques en conditions normales d'utilisation (Figure II.10). [19]

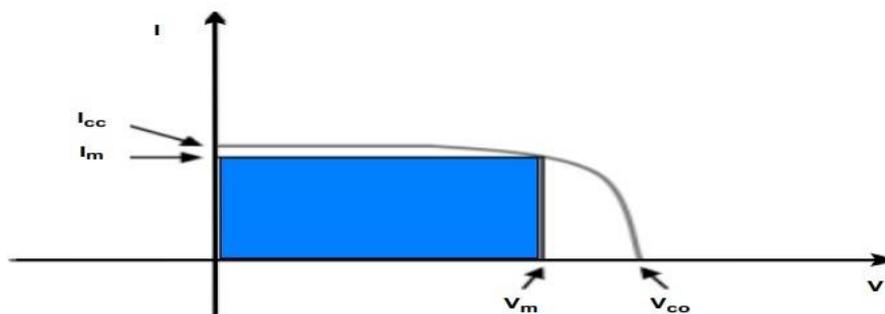


Figure II.10 Caractéristique d'une cellule Photovoltaïque. [19]

#### II.2.4.5 Technologie des cellules photovoltaïque

Les avancées technologiques ont conduit à la distinction de trois générations de cellules photovoltaïques :

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

Les cellules de première génération utilisent une seule jonction P-N et sont principalement fabriquées avec du silicium cristallin comme matériau semi-conducteur. La production de ces cellules, à partir de wafers de silicium, est coûteuse et énergivore, car elle exige un silicium de haute pureté. Les cellules à base de silicium sont également classées selon qu'elles sont fabriquées avec du silicium monocristallin ou du silicium polycristallin. [21] [22]

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

Ces dernières années, des technologies de couches minces ont émergé. Elles sont plus fines et semblent avoir un fort potentiel de croissance sur le marché. Les cellules dites "couches minces" sont considérées comme la deuxième génération de cellules solaires, car elles ont succédé aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses. Il existe plusieurs types de cellules couche mince, notamment :

- le silicium amorphe (a-si).
- le tellure de Cadmium (CdTe).
- le cuivre/indium/sélénium ou cuivre/indium/Gallium/sélénium [23].

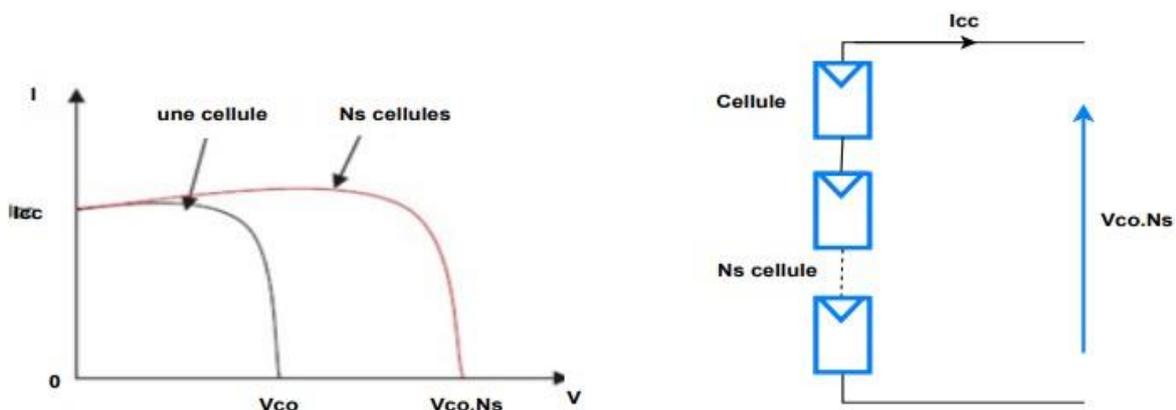
### c. Technologies de la 3ème génération « les cellules organiques » :

Ces cellules sont composées de molécules organiques, qui offrent à la fois flexibilité et légèreté. Trois types de cellules organiques existent : moléculaires, polymères et hybrides. Ces technologies sont actuellement en phase de recherche et développement [22].

#### II.2.4.6 Regroupement des cellules

##### a. Regroupement en série :

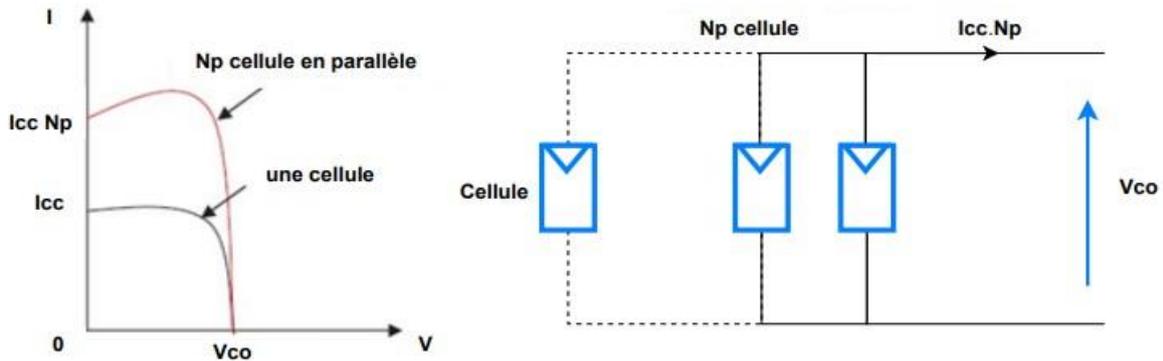
En combinant en série ( $N_s$ ) cellules photovoltaïques, on peut augmenter la tension de sortie du générateur (Figure I.11). Dans ce cas, chaque cellule est parcourue par le même courant et la caractéristique électrique du groupement en série est obtenue en additionnant les tensions de chaque cellule. La figure ci-dessous résume les caractéristiques électriques d'une association série de ( $N_s$ ) cellules. [22].



**Figure II.11** Caractéristique courant tension de  $N_s$  cellule en série. [22]

##### b. Regroupement en parallèle :

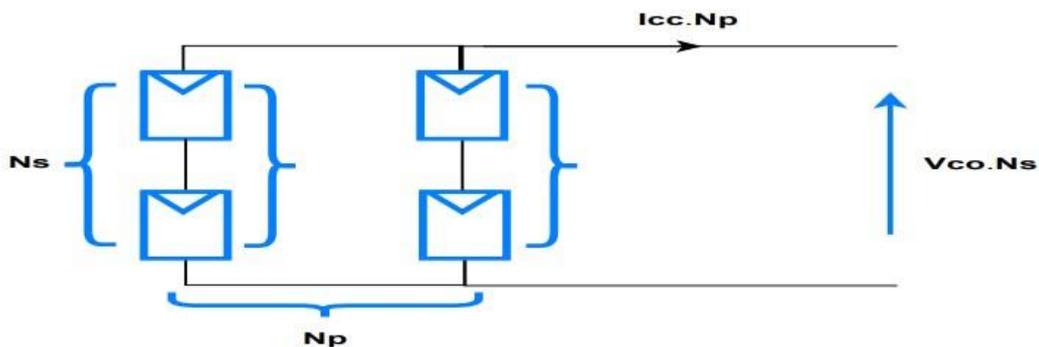
Il est possible de créer une association en parallèle de cellules ( $N_p$ ) selon la figure (II.12), ce qui permet d'augmenter le courant de sortie du générateur. Lorsqu'un groupe de cellules identiques est connecté en parallèle, toutes les cellules sont soumises à la même tension, et la caractéristique du groupe est obtenue en additionnant les courants. la figure ci-dessous résume les caractéristiques électriques d'une association parallèle de cellules. [23]



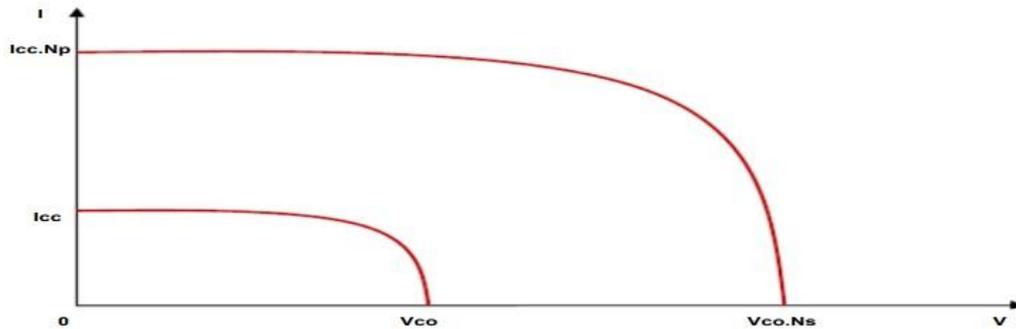
**Figure II.12** Caractéristique courant tension de ( $N_p$ ) cellules en parallèles. [23]

### c. Regroupement Mixte (série & parallèle) :

Le générateur photovoltaïque est composé d'un ensemble de modules photovoltaïques, qui sont organisés en panneaux photovoltaïques selon la figure (II.13). La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV est obtenue théoriquement en combinant les caractéristiques des cellules élémentaires, supposées identiques, qui le composent. Ces cellules sont agencées en un réseau série-parallèle, avec  $N_s$  cellules en série parallèlement à l'axe des tensions et  $N_p$  cellules en parallèle parallèlement à l'axe des courants. Cette organisation est illustrée par la figure (II.14). Les valeurs de  $N_s$  et  $N_p$  représentent respectivement le nombre total de cellules en série et en parallèle. [23]



**Figure II.13** Schéma d'association mixte des modules. [23]



**Figure II.14** Caractéristique résultante du regroupement mixte.

Dans le but d'augmenter la tension ou le courant de sortie, les générateurs photovoltaïques sont construits en combinant un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie et de caractéristiques identiques. Pour obtenir les caractéristiques électriques souhaitées (courant et tension suffisants), le câblage série-parallèle est utilisé pour réaliser un module PV (ou panneau PV). Ainsi, le regroupement en série permet d'augmenter la tension tandis que le regroupement en parallèle permet d'augmenter le courant. [24]

#### II.2.4.7 Avantages et inconvénients du système photovoltaïque

**a. Avantages [24] :** Le système photovoltaïque présente plusieurs avantages, notamment :

- Il permet d'obtenir une source d'énergie indépendante.
- Le rayonnement solaire, qui est utilisé comme combustible, est gratuit.
- L'entretien nécessaire est minimal.
- Il permet de générer l'énergie nécessaire pour les besoins en électricité.
- Il réduit la vulnérabilité aux pannes de courant.
- Il ne produit aucun bruit.
- Il ne pollue pas.
- Il est facile d'étendre le système

**b. Inconvénients [25] :** Le système photovoltaïque présente cependant également quelques inconvénients, notamment :

- Le coût actuel de cette technologie est plus élevé que celui de l'énergie traditionnelle.
- Le fonctionnement des panneaux photovoltaïques est dépendant des conditions météorologiques.
- Ils ne conviennent pas à des utilisations qui nécessitent une forte consommation d'énergie.

#### **II.2.4.8 Stockage de l'énergie électrique**

Le système de stockage est un composant crucial dans les systèmes autonomes car il permet de stocker l'énergie produite en excès pour la restituer ultérieurement en cas de besoin. Dans les systèmes réels, deux types de stockage sont souvent utilisés : les batteries et les supercondensateurs.

##### **➤ Les batteries :**

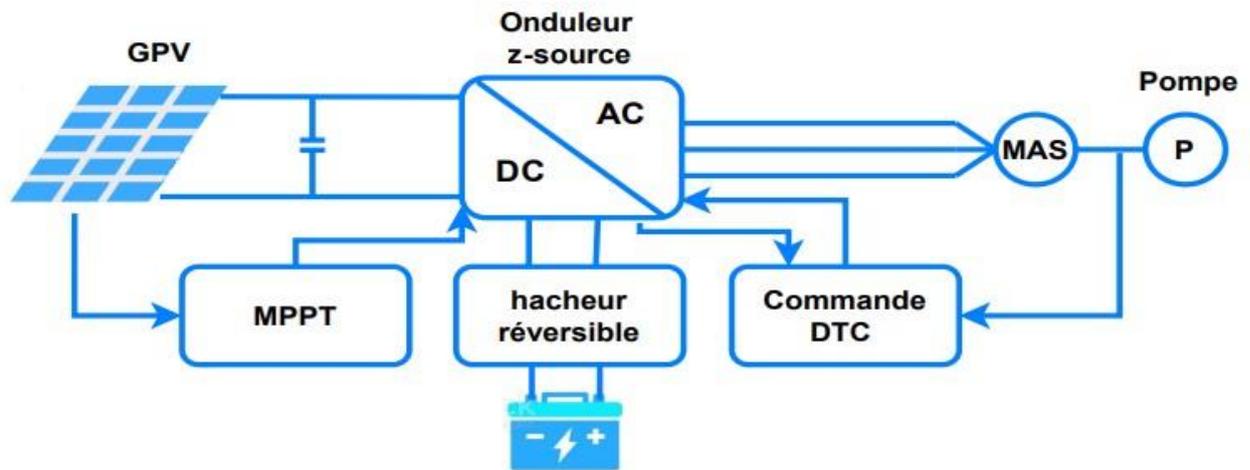
Le stockage électrochimique de faible encombrement est le plus souvent réalisé à l'aide de batteries d'accumulateurs [26]. Ces batteries sont largement utilisées en raison de leur technologie mature et de leurs prix raisonnables. Elles fonctionnent selon le principe de la pile, en réalisant une réaction d'oxydoréduction qui permet de stocker de l'énergie électrique lors de la charge, et de la restituer lors de la décharge avec un bon rendement, d'environ 85 % selon les types de batteries utilisées. Actuellement, trois familles de batteries sont couramment utilisées [27] [28] :

- Les batteries au plomb sont fréquemment employées pour fournir de l'énergie à des systèmes ne pouvant tolérer des coupures d'alimentation électrique, tels que (les installations hybrides en sites isolés ou les hôpitaux...).
- Les batteries au nickel-cadmium sont couramment utilisées dans les véhicules électriques, mais leur principal inconvénient est l'utilisation de cadmium, un métal lourd.
- Les différentes filières de batteries dérivées du lithium incluent notamment : les batteries lithium-ion, lithium-polymères, lithium-métal-polymères... etc.

➤ **Les supercondensateurs :**

Les supercondensateurs sont des solutions alternatives aux batteries qui existent depuis 20 ans. Ils sont similaires à des condensateurs, mais possèdent une capacité beaucoup plus grande, fonctionnant selon le même principe que les batteries [29].

### II.3 Structure du système de pompage



**Figure II.15** Structure d'un système de pompage photovoltaïque. [27]

Le pompage solaire avec batterie, utilisant des technologies avancées, offre une solution efficace pour l'approvisionnement en eau dans les zones où le réseau électrique est indisponible. Ce système utilise un algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour optimiser la production d'énergie solaire et garantir une utilisation efficace des panneaux photovoltaïques.

Dans cette configuration, l'énergie solaire est captée par les panneaux photovoltaïques, puis stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure. Le stockage de l'énergie électrique présente des avantages, notamment en termes de flexibilité et de gestion de la demande énergétique.

Pour convertir l'énergie stockée dans les batteries en énergie électrique utilisable pour le pompage de l'eau, un convertisseur DC-AC de type Z-source est utilisé. Ce type de convertisseur permet un contrôle précis du flux d'énergie entre les batteries et la machine asynchrone de pompage.

De plus, le système intègre un hacheur réversible en courant, qui est constitué de deux interrupteurs formant une cellule de commutation. Ce hacheur réversible assure le transfert énergétique de ou vers la batterie, permettant ainsi une gestion bidirectionnelle de l'énergie stockée.

L'ensemble du système de pompage avec batterie comprend donc des panneaux photovoltaïques, des batteries de stockage d'énergie, un convertisseur DC-AC de type Z-source, un hacheur réversible en courant, une machine asynchrone et un système de contrôle utilisant l'algorithme MPPT et le contrôle direct de couple (DTC). [27] [28]

#### **II.4 Conclusion**

Au terme de cette étude bibliographique, nous avons acquis une compréhension générale du pompage photovoltaïque, ce qui nous a permis de sélectionner avec soin les différents éléments de notre système de pompage, à savoir les panneaux photovoltaïques. Cette configuration de pompage offre une solution fiable, efficace et économique pour l'approvisionnement en eau dans les zones éloignées ou non connectées au réseau électrique.

# Chapitre III

---

Stratégie de la commande MPPT d'un  
hacheur boost & Z-source

---

# Chapitre III

## Stratégie de la commande MPPT d'un hacheur boost & Z-source

### III.1 Introduction

L'objectif de la commande d'un système pompage photovoltaïque est de pouvoir fournir l'énergie requise par la charge, bien que le caractère aléatoire des sources renouvelables puisse entraîner de grandes variations dans l'énergie produite.

Dans ce chapitre nous allons voir les résultats de notre travail que nous avons simulé avec Matlab/Simulink. Nous avons vu dans le chapitre précédent toutes les modélisations des éléments d'un système pompage photovoltaïque sachons que le système de pompage PV se compose d'un convertisseur DC/DC (Z-source) équipé d'une commande MPPT programmé avec l'algorithme « Perturbe and Observe » (P&O).

### III.2 Recherche du point de puissance maximale (MPPT)

Une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) associée à un étage intermédiaire d'adaptation permet de maximiser la production de puissance d'un générateur photovoltaïque (GPV). Quels que soient les conditions météorologiques, la commande du convertisseur maintient le système en permanence au point de fonctionnement maximum [30]. Ainsi, la chaîne de conversion photovoltaïque est optimisée à l'aide d'un convertisseur statique (CS) commandé par la MPPT. Ce système peut être représenté par le schéma de la Figure (III.1).

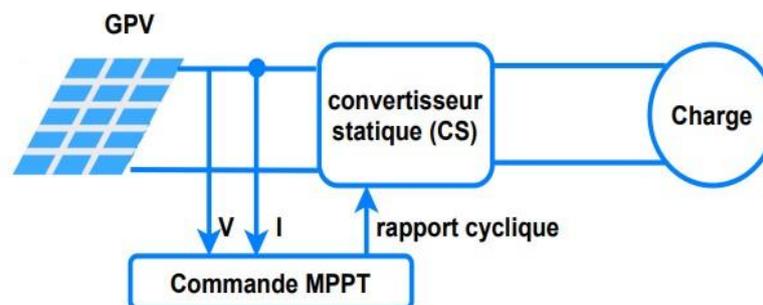


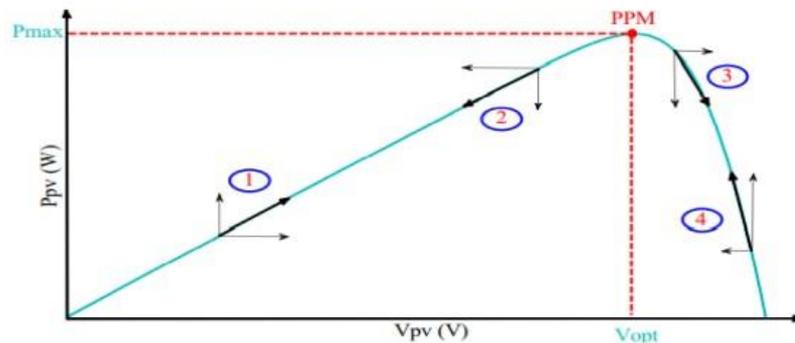
Figure III.1 Schéma de principe de la commande MPPT. [30]

#### III.2.1 Algorithmes de contrôle MPPT

Il existe plusieurs techniques de commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV tels que l'algorithme (P&O). Une synthèse des principaux est donnée dans cette partie :

### III.2.1.1 Algorithme de perturbation et observation

L'algorithme de perturbation et observation (connu sous le nom de P&O) est basé sur le principe du « hill climbing » (grimper une colline). C'est l'algorithme le plus couramment utilisé dans la littérature et dans la pratique, en raison de sa simplicité de mise en œuvre. L'objectif de cet algorithme est d'optimiser la puissance produite par le système en modifiant le point de fonctionnement du GPV par incrémentation ou décrémentation de la tension, et en observant l'effet de cette perturbation sur la puissance délivrée. Selon cette observation, l'algorithme prend une décision pour la prochaine itération. Quatre situations possibles pour l'algorithme P&O sont décrites dans la figure (III.2) et résumées dans le tableau (III.1). [31]



**Figure III.2** Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O. [31]

Cas $n^o$	$\Delta V$	$\Delta P$	$\frac{\Delta P}{\Delta V}$	Sens de la poursuite	Action de contrôle
1	+	+	+	Bon	Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
2	-	-	+	Mauvais	Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
3	+	-	-	Mauvais	Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$
4	-	+	-	Bon	Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$

**Table III.1** Principe de l'algorithme P&O. [31]

L'algorithme P&O (illustré dans la figure III.3) présente l'avantage d'offrir une grande précision et une réactivité rapide, permettant ainsi de déterminer le point de puissance maximale pour une certaine intensité lumineuse, une température donnée, ou un niveau de dégradation des caractéristiques. Cependant, cet algorithme est confronté à un problème :

- Dans des conditions de fonctionnement normales, on observe des oscillations autour du point de puissance maximale (PPM).
- L'algorithme présente une mauvaise convergence en cas de variations brusques de la température et/ou de l'intensité lumineuse.

Il est important de souligner que ces oscillations peuvent être réduites en choisissant un faible pas d'incrément, mais cela se fait au détriment du temps de convergence. Par conséquent, il est nécessaire de faire un compromis entre la précision et la rapidité en déterminant le pas de mise à jour optimal. [31]

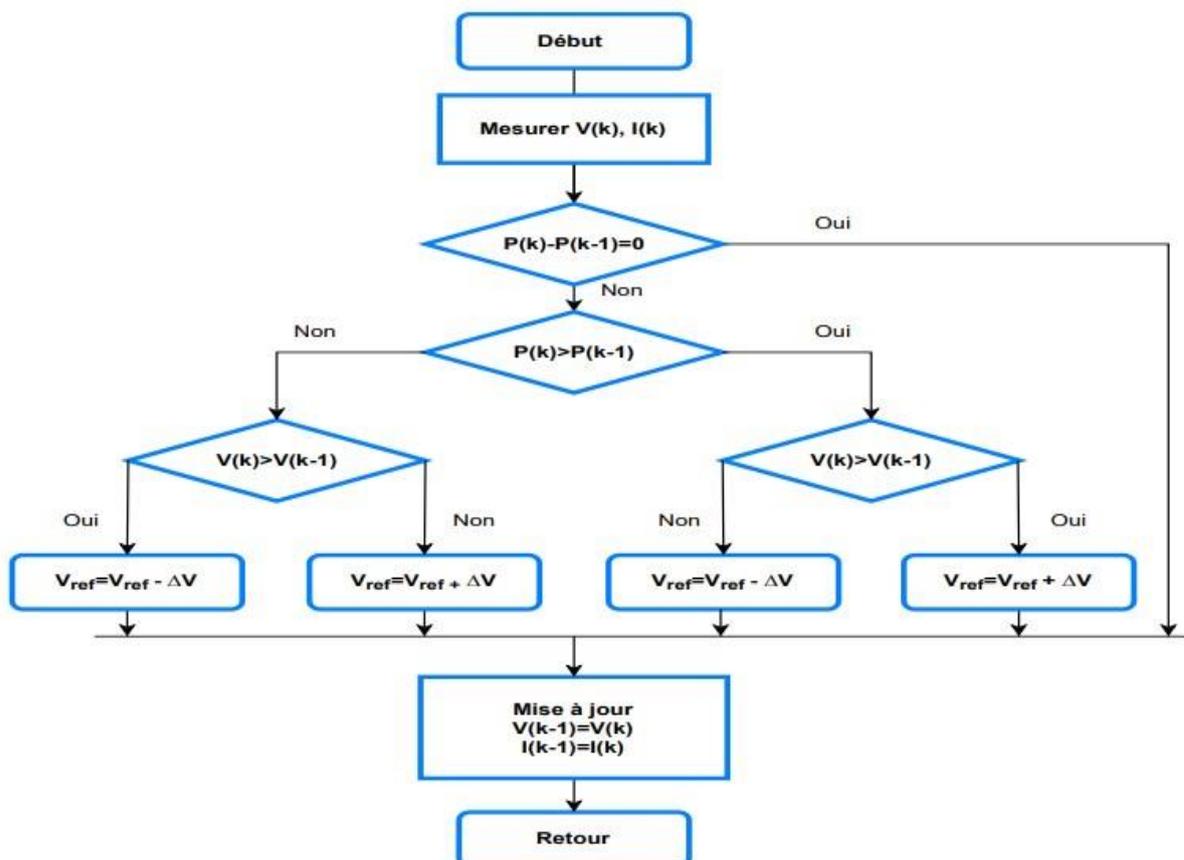


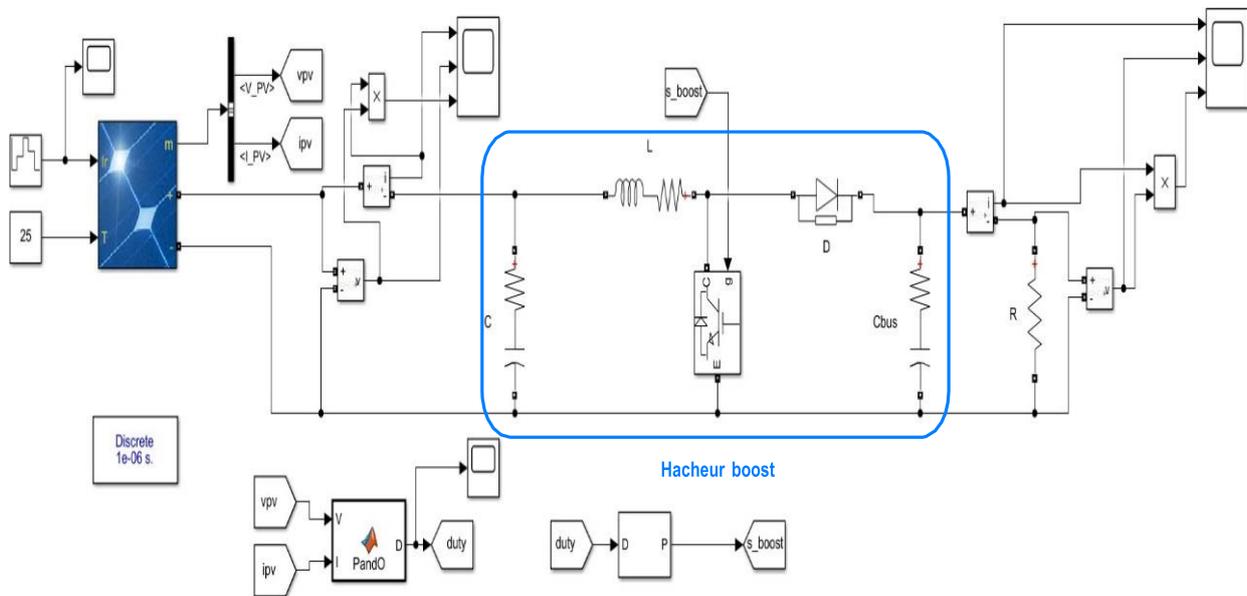
Figure III.3 Organigramme de la méthode P&O. [31]

### III.3 Simulation de la commande MPPT

L'outil qui permet d'utiliser l'algorithme MPPT est le convertisseur DC-DC relié aux panneaux photovoltaïques. L'algorithme MPPT reste le même, mais en l'utilisant avec un hacheur boost conventionnel et un hacheur Z-source.

#### III.3.1 MPPT en utilisant un hacheur boost conventionnel

Le schéma bloc de Simulation du système est présenté dans la figure ci-dessous par la méthode P&O:



**Figure III.4** Schéma bloc de Simulation de l'hacheur boost conventionnel

La simulation de cette chaîne sous MATLAB/SIMULINK, nous donne les résultats présentés par les figures ci-dessous :

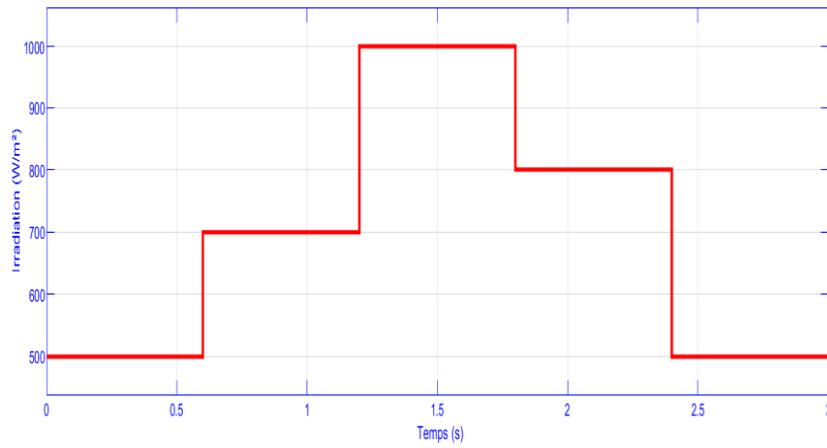
$$C = 0.33mF$$

$$C_{bus} = 3.3mF$$

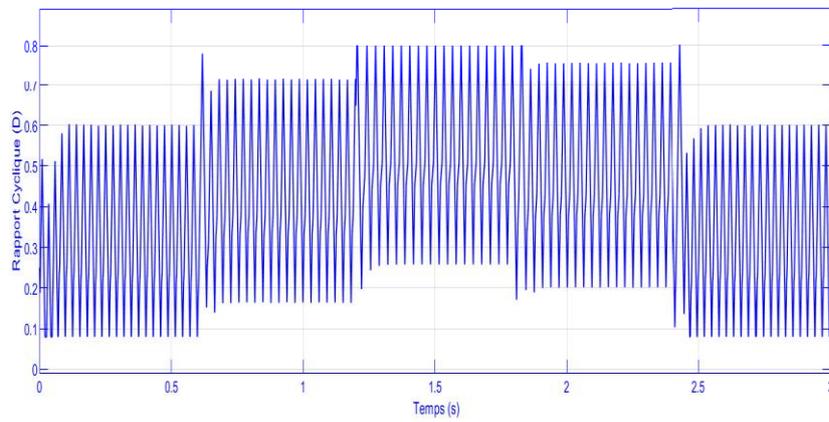
$$L = 40mH$$

$$R = 10\Omega$$

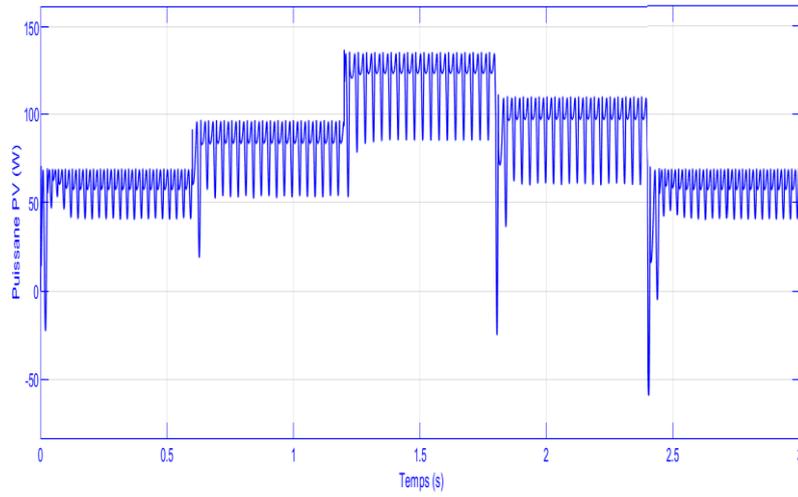
$$f = 5 KHz$$



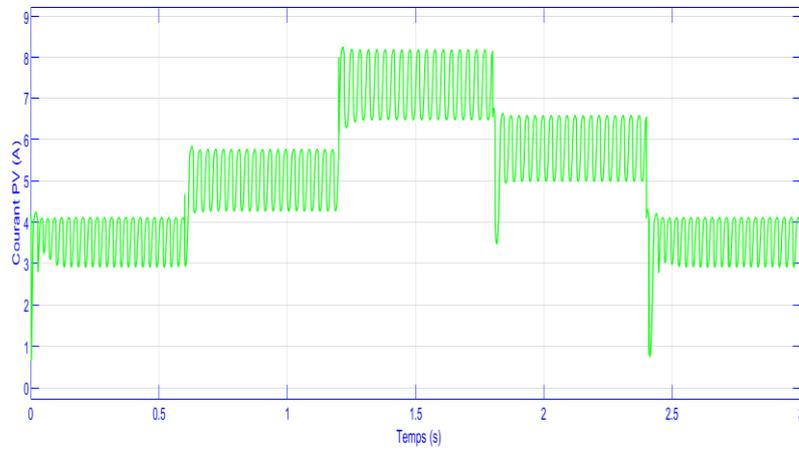
**Figure III.5** Profil d'irradiation.



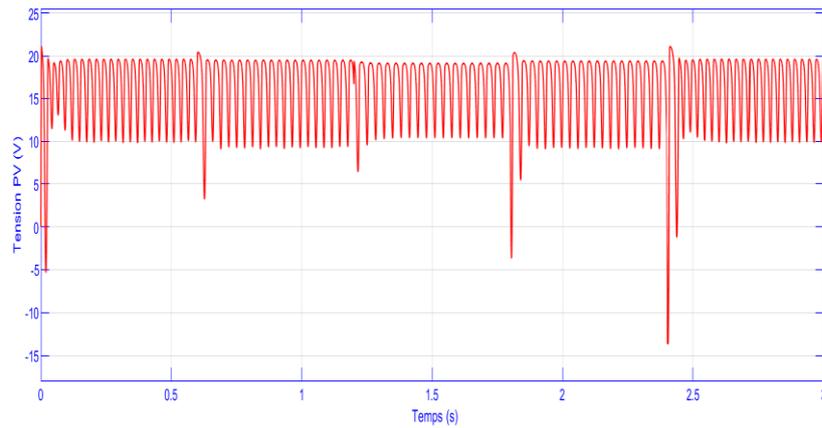
**Figure III.6** Rapport cyclique.



**Figure III.7** Puissance du GPV.



**Figure III.8** Courant du GPV.



**Figure III.9** Tension du GPV.

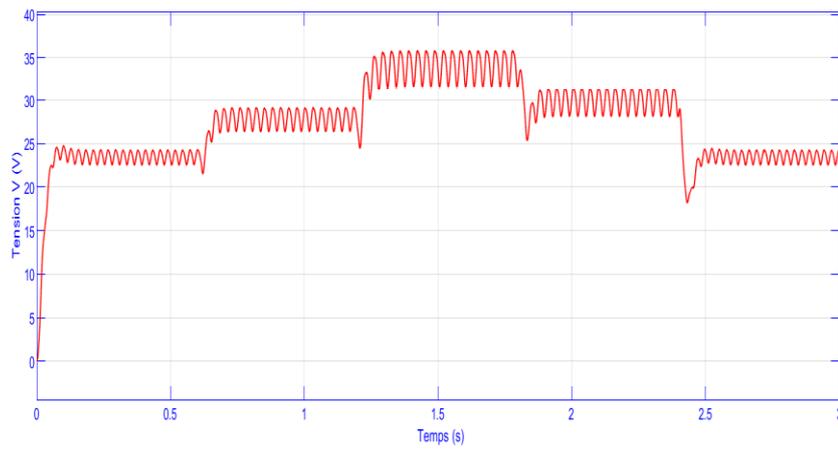


Figure III.10 Tension de charge

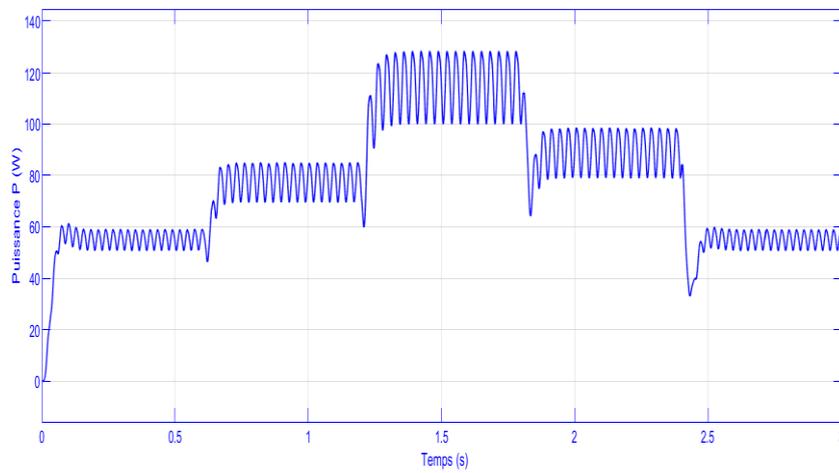


Figure III.11 Puissance de charge

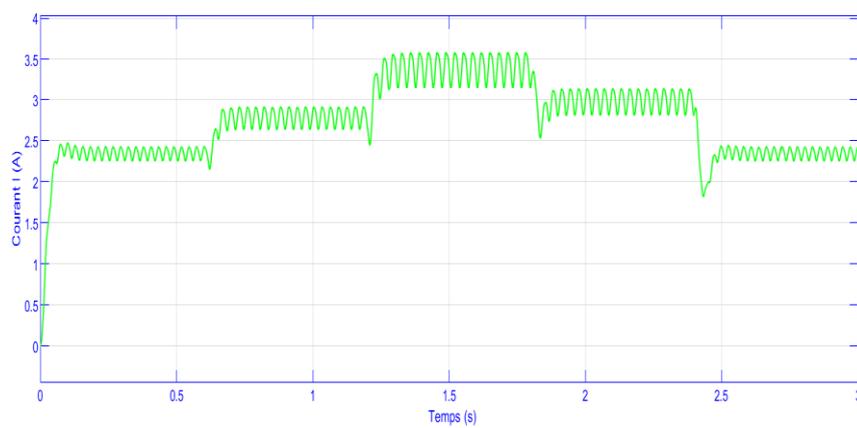


Figure III.12 Courant de charge

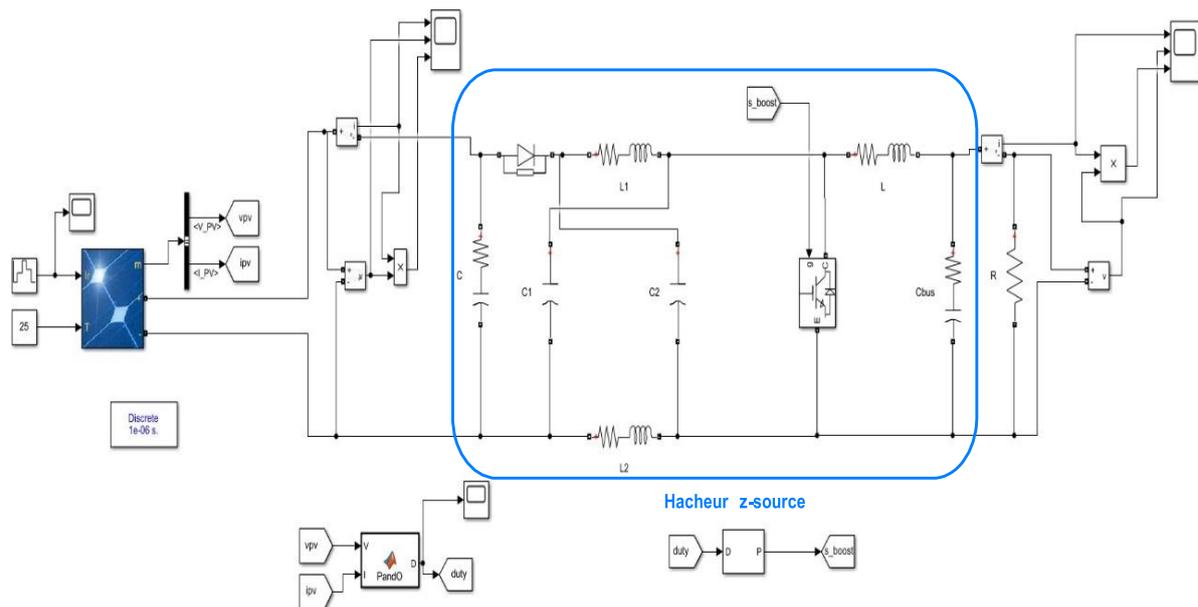
### III.3.1.1 Interprétations des résultats

La figure (III.7) montre bien que le GPV fonctionne à sa puissance maximale quel que soit l'irradiation, par exemple pour l'irradiation 1000 W/m<sup>2</sup> la puissance maximale est égale à 135 W. cela est assuré par la commande MPPT. La variation du courant en fonction de l'irradiation est plus importante que celle de la tension, comme nous montre les figures (III.8) et (III.9).

On remarque une petite différence entre la puissance d'entrée (puissance du GPV) et celle de la sortie (puissance de charge). Cette différence représente les pertes de puissance qui se divisent en deux parties. La première partie concerne les pertes résistives dues aux inductances et aux capacités (résistances internes). La deuxième partie concerne les pertes par commutation (les interrupteurs) causées par la diode et l'IGBT qui ne sont pas idéaux. L'allure du courant de charge et celle de la tension sont les mêmes, car la charge est une résistance.

### III.3.2 MPPT en utilisant un hacheur Z-source

Le schéma bloc de Simulation du système est présenté dans la figure ci-dessous par la méthode P&O :



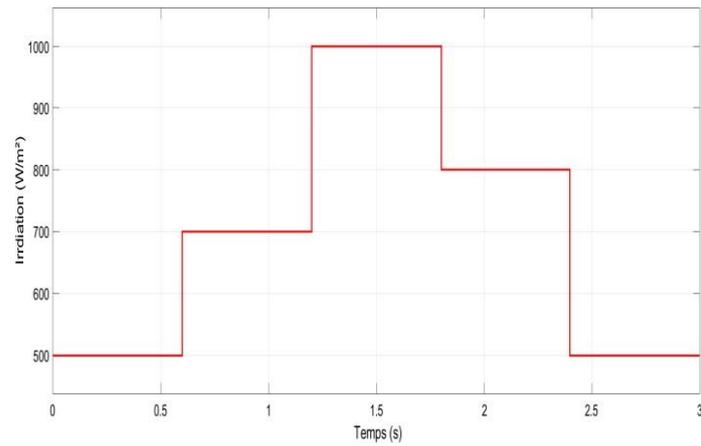
**Figure III.13** Schéma bloc de Simulation de l'hacheur Z-source

La simulation de cette chaîne sous MATLAB/SIMULINK, nous donne les résultats présentés par les figures ci-dessous :

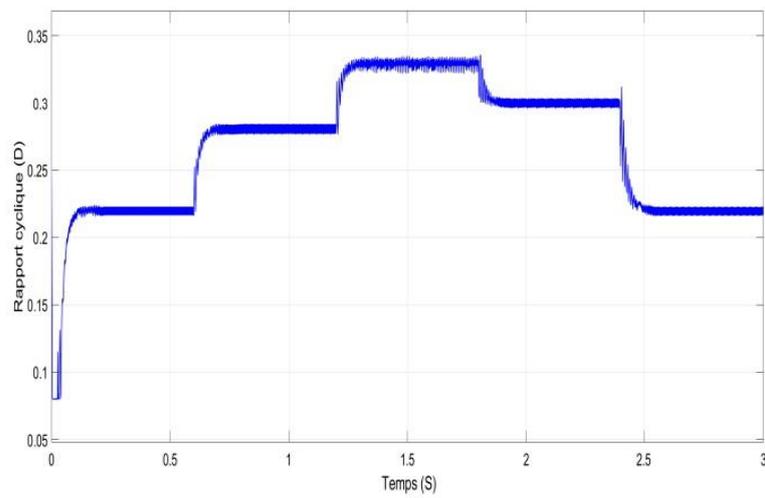
$$C = 0.33mF \quad , \quad L = 1mH \quad , \quad L_1 = L_2 = 1mH$$

$$C_1 = C_2 = 0.47mF \quad , \quad R = 10\Omega$$

$$C_{bus} = 3.3mF \quad , \quad f = 5 \text{ kHz}$$



**Figure III.14** Profil d'irradiation.



**Figure III.15** Rapport cyclique

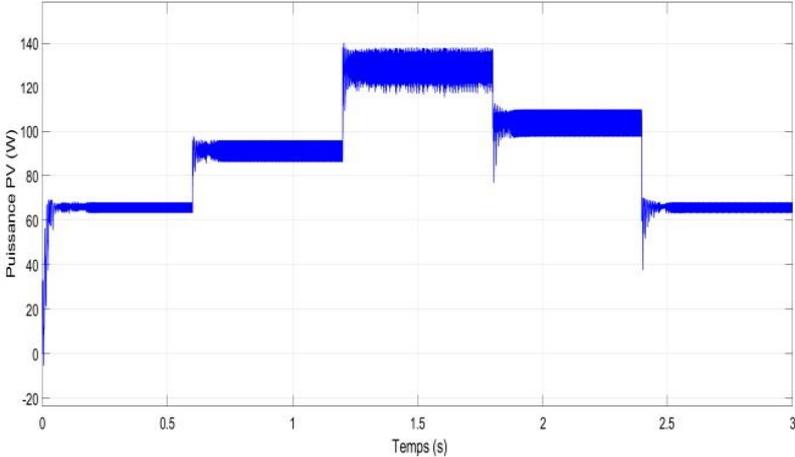


Figure III.16 Puissance du GPV

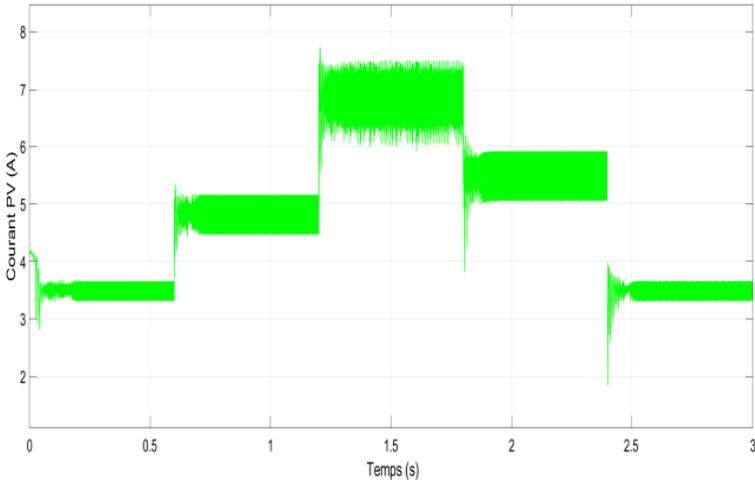


Figure III.17 Courant du GPV

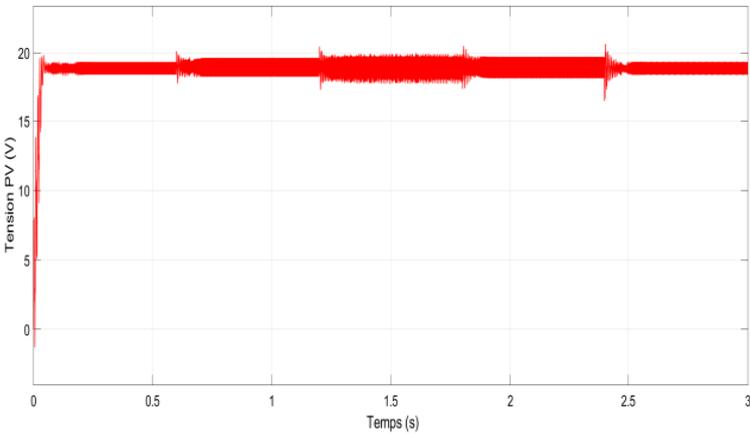


Figure III.18 Tension du GPV

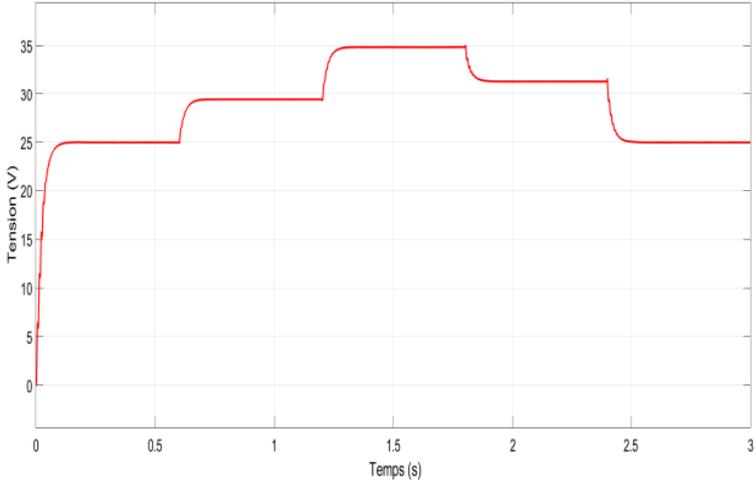


Figure III.19 Tension de charge

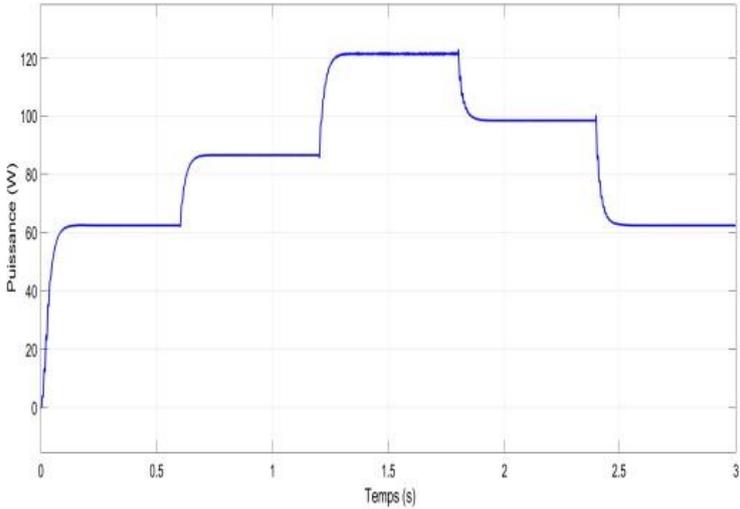
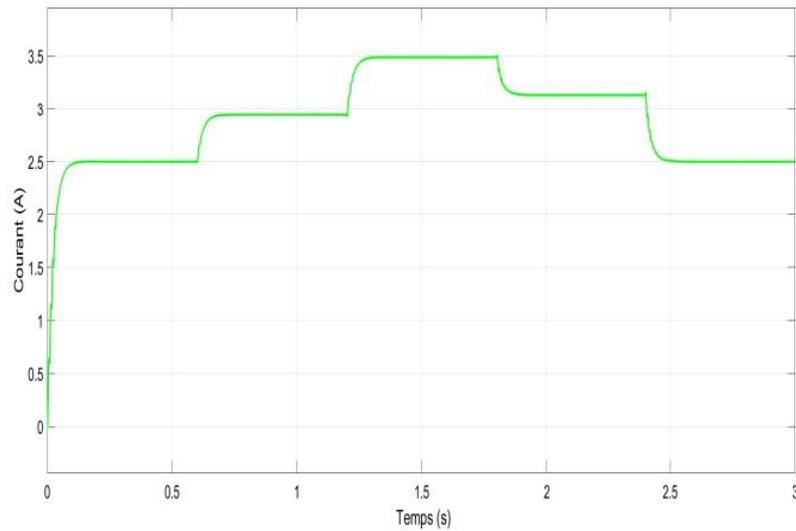


Figure III.20 Puissance de charge



**Figure III.21** Courant de charge

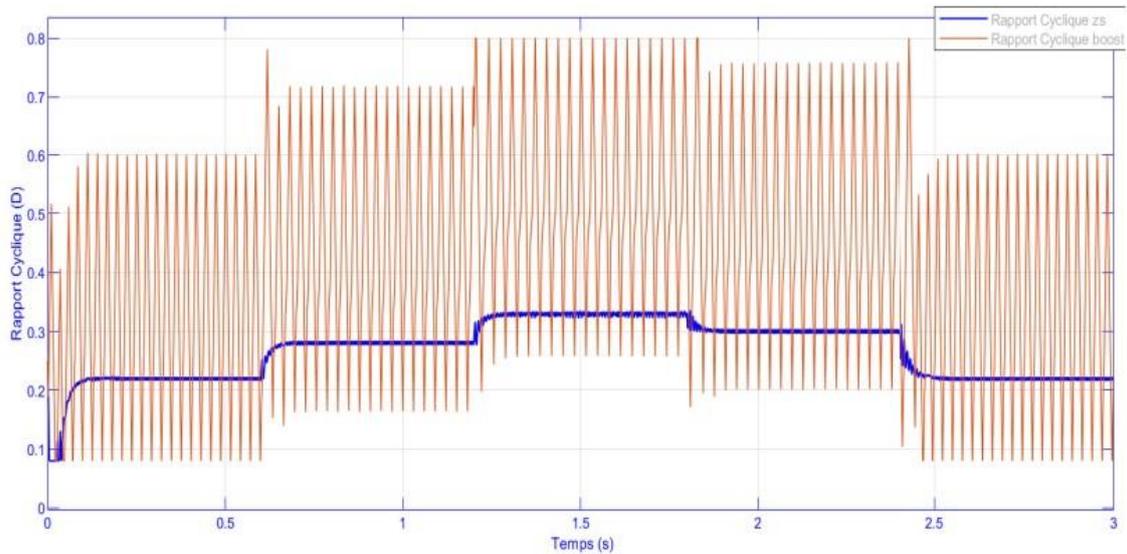
### III.3.2.1 Interprétations des résultats

La figure (III.16) illustre clairement que le GPV fonctionne à sa puissance maximale quelle que soit l'irradiation, par exemple, à une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$ , la puissance maximale atteint  $138 \text{ W}$ , grâce au contrôle MPPT. La variation du courant en fonction de l'irradiation est plus significative que celle de la tension, comme le montrent les figures (III.17) et (III.18).

Une légère différence entre la puissance d'entrée (puissance du GPV) et la puissance de sortie (puissance de charge) est observée. Cette différence représente les pertes de puissance, qui se divisent en deux parties. La première partie concerne les pertes résistives attribuables aux inductances et aux capacités (résistances internes). La deuxième partie concerne les pertes par commutation (les interrupteurs) causées par la diode et l'IGBT aussi qui ne sont pas idéaux et le courant de charge et la tension présentent une allure similaire.

### III.3.3 Comparaison et discussion des résultats

La figure (III.22) représente la Comparaison du rapport cyclique entre le hacheur boost et le hacheur Z-source.



**Figure III.22** Comparaison du rapport cyclique entre le hacheur boost et le hacheur Z-source.

Notez que les deux convertisseurs fonctionnent avec la commande MPPT. Mais le choix dépend des caractéristiques des convertisseurs utilisés. Cependant, un convertisseur Z-source fournit de meilleurs résultats qu'un convertisseur élévateur en termes de réduction des ondulations de courant et de tension. Le convertisseur Z-source permet de fonctionner à des rapports cycliques plus faibles que le convertisseur Boost classique, ce qui réduit les pertes de commutation et améliore l'efficacité globale du système.

### **III.4 Conclusion**

Au cours de ce chapitre la commande d'un système de pompage photovoltaïque a été simulée par le logiciel MATLAB/Simulink. Nous avons utilisé une technique MPPT pour extraire la puissance maximale du GPV cette dernière est appelée perturbation et observation « P&O ».

Enfin on peut conclure d'après les résultats obtenus l'efficacité des commandes appliquées au système de pompage photovoltaïque.

---

## Conclusion générale

---

## Conclusion générale

L'utilisation de l'énergie solaire comme source alternative d'énergie est confrontée à des défis tels que le coût élevé des cellules solaires, le faible rendement et la puissance intermittente selon les conditions météorologiques., la technique d'optimisation du générateur solaire étudiée est la perturbation et l'observation (P&O) utilisée par les concepteurs de suiveur de point de puissance maximale (MPPT). De plus, la commande d'un convertisseur Z-source pour le pompage photovoltaïque est une solution efficace pour les applications nécessitant des performances élevées et une tension d'entrée continue variable.

Le travail présenté dans ce mémoire est une tentative pour arriver à une configuration du système solaire photovoltaïque optimale et des topologies de convertisseurs les plus appropriées.

On a donc, Commencé par une présentation sur les convertisseurs de puissance tels que les non réversibles (le Buck, le Boost, et le Buck-Boost), et on a présenté aussi des généralités sur les convertisseurs Z-source.

Dans le chapitre 2, nous avons acquis une compréhension générale sur la modélisation des éléments du système pompage photovoltaïque et les caractéristiques du système solaire photovoltaïque et ses performances.

En fin, nous avons achevé ce travaille par la présentation de la partie simulation, nous avons fait une comparaison entre un hacheur boost conventionnel et un hacheur Z-source à l'aide de la commande MPPT et nous avons fait une comparaison entre les deux convertisseurs , les résultats de simulation obtenus ont montré que le convertisseur Z-source fournit de meilleurs résultats qu'un convertisseur élévateur en termes de réduction des ondulations de courant et de tension Les résultats de simulation obtenus ont montré. De plus, la commande d'un convertisseur Z-source pour le pompage photovoltaïque est une solution efficace pour les applications nécessitant des performances élevées et une tension d'entrée continue variable.

Ce travail offre quelques perspectives tels que le développement du mode connecté au réseau pour le convertisseur Z-source peut être démontré avec de nouvelles stratégies de contrôle employant des techniques de MPPT pour les systèmes solaires photovoltaïques. Ainsi qu'un travail approfondi pourra être consacré pour les différentes topologies des convertisseurs Z-source pour les systèmes solaires photovoltaïques.

---

# Bibliographie

---

# Bibliographie

- [1] SaifiAmel , « Alimentation d'un moteur à courant continu à l'aide d'un hacheur commandé par un microcontrôleur Arduino », mémoire de Master, Université de Batna 2, 2016.
- [2] François Gruson<sup>1</sup>, Arnaud Videt<sup>1</sup>, Philippe Le Moigne<sup>1</sup>, Philippe Delarue<sup>2</sup>, Philippe Baudesson<sup>3</sup>, Jacques Ecrabey<sup>4</sup> , « Intérêt de la structure onduleur Zsource », L2EP-Ecole Centrale de Lille, Cité Scientifique – BP 48, 59651 Villeneuve d'Ascq cedex, L2EP-U.S.T.L. bât. P2, Cité Scientifique, 59655 Villeneuve d'Ascq, Schneider Toshiba Inverter Europe, 33 rue Blanchet, 27120 Pacy-sur-Eure, Schneider Electric, Site 38 Tec Rue Henri Tarze, 38000 Grenoble
- [3] HansruediBühler, "Convertisseurs statiques", Presses polytechniques et universitaires romandes, 1991
- [4] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [5] "Etude d'un Hacheur à Stockage Capacitif", Mémoire de Master, 2014, Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouaghi, Département de Génie Electrique
- [6] H. Bin, " Convertisseur continu-continu à rapport de transformation élevé pour applications pile à combustible", Thèse Doctorat de l'institut national polytechnique de Lorraine, France, 2009.
- [7] Robert W. Erickson (Auteur), DraganMaksimovic, "Fundamentals of Power Electronics", 2nd Ed. Kluwer Academic Publishers, 2001
- [8] AHMADI ISMAIL, " Etude et simulation d'un système de pompage d'eau couplé à un générateur photovoltaïque", Mémoire de Master, Université Larbi ben M'Hidi– Oum El Bouaghi. 2013.
- [9] S. Djeriou. Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magister, Université Ferhat Abbas, SétifAlgérie, Faculté de Technologie, 2014
- [10] ZianiSeyfeddine et OuldMammar Mohamed, «Etude et simulation d'un hacheur Boost pour suivre le point de puissance maximal (MPPT) », Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2017.

- [11] Fang Zheng Peng, "Z-Source inverter", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No. 2, pp. 504-510, 2003.
- [12] N. Amala Sri, K.Ravi Shankar, "Grid Connected Photovoltaic Power Generation Controller Z-Source Inverter with Single Stage Power Conversion", IJMETMR, ISSN No. 2348-4845, Vol. 1, No. 11, pp. 66-71, 2014.
- [13] Miao Zhu, Kun Yu and Fang Lin Luo, "Switched Inductor Z-Source Inverter", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 25, No. 8, pp. 2150-2158, 2010.
- [14] A. BOUSHABA, A. SANET, "Etude et commande d'un convertisseur Z-source", Projet de Fin d'Étude, École Nationale Polytechnique, Alger, 2014.
- [15] SMAIL, B et HAMID, I. (2019). Etude Technico-économique de Système de Pompage Photovoltaïque, en Comparaison aux autres Production d'eau, cas de la Région de Mostaganem. Mémoire de Master, Université de Abdelhamid Ibn Badis, MOSTAGANEM.
- [16] S. AOUI « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque » Thèse Magister université Sétif 1, 2014.
- [17] Récupéré sur :  
<https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologierayonnement-solaire13785/>
- [18] Récupéré sur : <https://energiepluslesite.be/théories/climat8/ensoleillement-d8/>
- [19] S. Djeriou, « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone », thèse de magistère, Université Ferhat Abbas- Sétif-UFAS (Algérie), 2011
- [20] A. Laboure, M. Viloz « Énergie solaire photovoltaïque », Environnement et Sécurité, Tome III, Paris, pp. 01-48, 2006.
- [21] SOCOMEC, Cahier technique photovoltaïque 2010.
- [22] S. Makhloufie : « Contribution à l'optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes ». Thèse de doctorat en science université de Batna 2013.
- [23] F. Chen, W. Lei, G. Tao, and B. Jiang, "Actuator fault estimation and reconfiguration control for the quad-rotor helicopter," International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 13, no. 1, p. 33, 2016.

- [24] S. LALOUNI « Optimisation de la qualité d'énergie électrique dans le cas d'un chargeur de batteries » Mémoire Magister université Bejaia, 2005.
- [25] M. Anki et A. Bouallag « Contribution à l'étude et à l'optimisation d'un système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Master université de Bejaia 2012.
- [26] R. Mosdale, « Transport électrique routier-batteries pour véhicules électriques, Techniques de l'Ingénieur, no. D5565, 2003.
- [27] F. Ferrari, « Bref comparatif des technologies de batteries", consulté sur site internet, <http://www.masolise.com/comparatif-technologie-batterie>, 28/04/2016.
- [28] M. Urbain, « Modélisation électrique et énergétique des accumulateurs Lithium -Ion. Estimation en ligne du SoC et du SoH », Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [29] J.C. Lassègues, « Supercondensateurs » Techniques de l'Ingénieur, no. D3334, 2001.
- [30] H. Al-Atrash, I. Batarseh, K. Rustom, “Statistical modeling of DSP-based hillclimbing MPPT algorithms in noisy environments, Conference and Exposition in Twentieth Annual IEEE Conference in Applied Power Electronics, APEC 2005, vol. 3, pp. 1773-1777.
- [31] W. Xiao, W. Dunford, A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems, IEEE 35th annual Conference in Power electronics specialists, PESC 04. 2004, vol. 3, pp. 1957-1963.

---

# Annexes

---

## Annexes

### Annexe A



Logiciels Utilisés Matlab & Simulink : Simulink est un environnement de programmation graphique basé sur MATLAB pour la modélisation, la simulation et l'analyse de systèmes dynamiques multi domaines. Son interface principale est un outil graphique de diagramme de blocs et un ensemble personnalisable de bibliothèques de blocs. Il offre une intégration étroite avec le reste de l'environnement MATLAB et peut soit piloter MATLAB, soit être scriptée à partir de celui-ci. Simulink est largement utilisé dans le domaine de la commande automatique et du traitement des signaux numériques pour la simulation multi domaine et la conception à base de modèles.

**Annexe B**

```

Programme de MPPT (P&O)
function Vref = fcnb (V, I)
Vrefmax = 750 ;
Vrefmin = 0 ;
Vrefinit = 300 ;
deltaVref = 0.1 ;
persistent Vold Pold Vrefold ;
dataType = 'double' ;
if isempty (Vold)
Vold = 0 ;
Pold = 0 ;
Vrefold = Vrefinit ;
end
P = V*I ;
dV = V-Vold ;
dP = P-Pold ;
if dP >= 0
if dP < 0
if dV < 0
Vref = Vrefold + deltaVref ;
else
Vref = Vrefold - deltaVref ;
end
else
if dV < 0    Vref = Vrefold - deltaVref ;
else
Vref = Vrefold + deltaVref ;
end
end
else
Vref = Vrefold ;
end
if Vref >= Vrefmax || Vref < Vrefmin
Vref = Vrefold ;
end
Vrefold = Vref ;
Vold = V ;
Pold = P ;

```

## Résumé

Pour choisir les sources appropriées, il faut d'abord choisir l'architecture de base du flux d'énergie, en ce qui concerne la réversibilité de l'énergie électrique et la stabilité du système, comme un système de panneaux photovoltaïques avec des batteries de stockage. En outre, la tension de sortie de ces sources est relativement faible et, en général, une tension élevée du bus continu est nécessaire. Et parmi les éléments de la chaîne de conversion photovoltaïque qui imposent certaines limitations c'est les hacheurs et surtout les convertisseurs Z-source à gain élevé qui jouent un rôle important dans l'interface entre les panneaux photovoltaïques et le bus continu. Alors, ces convertisseurs ont de meilleures caractéristiques que les convertisseurs conventionnels en matière de rendement et de gain.

**Mots clés :** Hacheur boost, Z-source, MPPT, GPV

## Abstract

To choose the right sources, we first need to select the basic architecture of the energy flow, in terms of reversibility of electrical energy and system stability, such as a system of photovoltaic panels with storage batteries. In addition, the output voltage of these sources is relatively low and, in general, a high DC bus voltage is required. And among the elements of the photovoltaic conversion chain that impose certain limitations are the choppers and especially the high-gain Z-source converters that play an important role in the interface between the photovoltaic panels and the DC bus. These converters have better efficiency and gain characteristics than conventional converters.

**Keywords:** Chopper boost, Z-source, MPPT, GPV

## ملخص

من أجل اختيار المصادر المناسبة، من الضروري أولاً اختيار البنية الأساسية لتدفق الطاقة، مع مراعاة قابلية انعكاس الطاقة الكهربائية واستقرار النظام، مثل نظام الألواح الكهروضوئية مع بطاريات التخزين. بالإضافة إلى ذلك، يكون جهد الخرج لهذه المصادر منخفضاً نسبياً، وبصفة عامة، يلزم وجود جهد ناقل تيار مستمر مرتفع. ومن بين عناصر سلسلة التحويل الكهروضوئية التي تفرض قيوداً معينة هي المروحيات وخاصة محولات المصدر Z عالية الكسب التي تلعب دوراً مهماً في الواجهة بين الألواح الكهروضوئية وناقل التيار المستمر. تتميز هذه المحولات بخصائص أفضل من المحولات التقليدية من حيث الكفاءة والكسب.

**الكلمات المفتاحية-**

MPPT, المولدات الكهروضوئية GPV -تعزيز المروحية (الفرع), محول Z-source