

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
المركز الجامعي لعين تموشنت  
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent  
Institut de Technologie  
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
**Domaine** : SCIENCE ET TECHNOLOGIE.  
**Filière** : ELECTROTECHNIQUE.  
**Spécialité** : COMMANDE ELECTRIQUE.

Thème

*Implémentation de l'électronique de puissance dans un  
Système Photovoltaïque PV.*

**Présenté Par :**

Bekradda Bochra

Diffalah chawki mohamed

**Devant les jurys composés de :**

Mr. Mecirdi Nour Eldin

MAB

C.U.B.B (Ain Temouchent)

Président

Dr. Krim Mohamed

MAA

C.U.B.B (Ain Temouchent)

Encadrant

Mr. Baghdadi Benazza

MAB

C.U.B.B (Ain Temouchent)

Examineur

*Année universitaire 2019/2020*

# *Dédicaces*

*A ma famille et à mes amis,*

*Pour la patience et le dévouement dont ils ont fait preuve.*

*A toute personne qui nous aidés du pré ou du loin a terminer ce travail  
soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre  
soutien infailible.*

*Merci d'être toujours là pour moi.*

*DIFFALAH Chawki Mohamed.*





# *Dédicaces*

*Avant tous, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leur soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices.*

***BEKRADDA Bochra.***





## *Remerciements*

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience.*

*Nos remerciements les plus sincères, à nos enseignants (es) pour leurs connaissances leurs patiences, en signe d'un profond respect.*

*Je souhaite également remercier le directeur d'études Docteur Krim Mohamed qui malgré son temps difficile nous a aidé à travers ses remarques pertinentes. En dernier lieu je remercie l'administration de centre Belhadj Bouchaib de la wilaya d'Ain-Temouchent.*



*Merci*

# Table des matières

<i>Dédicaces</i> .....	<i>i</i>
<i>Remerciements</i> .....	<i>iii</i>
<i>Table des matires</i> .....	<i>iv</i>
<i>Liste des symboles</i> .....	<i>viii</i>
<i>Liste des figures</i> .....	<i>ix</i>
<i>Liste des tableaux</i> .....	<i>xiv</i>

<i>Introduction Générale</i> .....	<i>1</i>
------------------------------------	----------

## **Chapitre 1 : Généralités sur L'énergie Photovoltaïque PV**

1. Introduction .....	5
1.1 Des énergies renouvelables : .....	5
1.1.1 Définition des énergies renouvelables .....	5
1.1.2 Les types d'énergies renouvelables .....	5
Les différents types d'énergies renouvelables sont .....	5
1.1.3 Définition et Historique photovoltaïque: .....	6
1.1.3.1 Définitions : .....	6
1.1.3.2 Histoire : .....	6
1.1.4 L'énergie solaire photovoltaïque : .....	8
1.1.4.1 L'énergie solaire : .....	8
1.1.4.2 Le spectre du rayonnement : .....	9
1.1.4.3 Les types du rayonnement : .....	10
1.1.5 L'effet photovoltaïque : .....	11
1.1.5.1 La cellule photovoltaïque : .....	11
1.1.5.2 Principe de la conversion photovoltaïque : .....	12
1.1.6 Technologie des cellules solaires : .....	12
1.1.6.1 Les types des cellules : .....	12
1.1.7 Associations module photovoltaïque : .....	14
1.1.8 Caractéristiques d'un module photovoltaïque : .....	16

1.2	Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :.....	17
1.3	Conclusion :.....	19

## **Chapitre 2 : *Convertisseurs Statique de L'Electronique des Puissances***

2.	Introduction :.....	20
2.1	Les convertisseurs statiques :.....	20
2.1.1	Définition :.....	20
2.1.2	Fonctions de base et terminologie des convertisseurs statiques :.....	20
2.1.3	Les différents convertisseurs :.....	21
2.2	Convertisseurs continus-continus (DC/DC) ou les hacheurs :.....	22
2.2.1	Choix des composants de commutateurs.....	22
2.2.2	Convertisseur Boost :.....	23
a)	Schéma du convertisseur Boost :.....	24
b)	Principe de fonctionnement :.....	25
2.2.3	Convertisseur Buck.....	28
a)	Schéma du convertisseur Buck.....	28
b)	Principe de fonctionnement :.....	29
2.2.4	Convertisseur Buck-Boost :.....	32
a)	Schéma du convertisseur Buck-Boost :.....	32
b)	Principe de fonctionnement :.....	32
2.3	Comparaison entre les différents types de convertisseur DC-DC :.....	35
2.4	Modélisation d'un système photovoltaïque :.....	35
2.5	Les convertisseurs DC/AC (ou Onduleur) :.....	36
2.5.1	Principe de fonctionnement d'un onduleur :.....	36
2.6	Modulation d'un système photovoltaïque aux réseaux électriques :.....	38
2.6.1	Structure à convertisseur unique :.....	38
2.6.2	Structure avec bus à basse tension alternative.....	39
2.7	Commande de l'onduleur :.....	39
2.7.1	Commande par hystérésis :.....	40
2.7.2	Commande par MLI :.....	41
2.8	Conclusion :.....	42

## Chapitre 3 : Commande de maximisation de puissance MPPT

3.1	Classification de l'algorithme de suiveur de la puissance max.....	43
3.1.1	Les méthodes indirectes : .....	43
3.1.2	Les méthodes directes : .....	45
3.2	Commande de maximisation de puissance d'un convertisseur DC/DC .....	45
3.2.1	Le principe de la commande MPPT : .....	46
3.2.2	Les Algorithmes MPPT : .....	47
3.2.2.1	Commande de Perturbe & Observe (P&O) .....	48
3.2.2.2	Commande d'incrément de la conductance (ou IncCond) : .....	50
3.2.3	Les avantages et les inconvénients : .....	53
3.3	Conclusion : .....	55

## Chapitre 4 : Simulation et leur Performance de convertisseur de puissance au PV connecté Au réseau

4.	Introduction : .....	56
4.1	Description du système étudié.....	58
4.1.1	Présentation de la structure du système photovoltaïque au réseau électrique proposé.....	57
4.1.2.1	Simulation d'un système photovoltaïque .....	59
4.1.2.2	Simulation d'un système de convertisseur avec MPPT .....	61
A)	Simulation avec de la méthode MPPT« P&O » : .....	62
4.1.3	Onduleur triphasé commande MLI .....	72
4.2	Système photovoltaïque connecté au réseau : .....	73
4.3	Conclusion:.....	80
	<b>Conclusion générale</b> .....	<b>81</b>
	<b>Référence Bibliographiques</b> : .....	<b>83</b>

### *Resumés*

## *Liste des symboles*

<i>Symbole</i>	<i>Signification</i>
PV	Photovoltaïque
SPV	Le système photovoltaïque
GPV	Générateur Photovoltaïque
DC	Courant Continu (Direct Current)
AC	Courant Alternatif (Alternative Current)
MPPT	Maximum Power Point Tracking
P&O	Perturbation et Observation
MPP	Point de fonctionnement optimal 'Maximum Power Point
H	La constante de Planck
C	La vitesse de la lumière
$\lambda$	La longueur d'onde
E (J)	Energie en Joule
$\nu$ (Hz)	Fréquence
W <sub>c</sub>	Watt crête
IGBT	Insolated Gate Bipolar Transistor
L	Inductance
$\eta$	Rendement
$\eta_{MPPT}$	Rendement MPPT
v	Tension
A	Courant
P	Puissance
CS	Convertisseur Statique
P <sub>in</sub>	La puissance lumineuse incidente
P <sub>max</sub>	La puissance maximale
V <sub>dc</sub>	Tension de bus continu
I <sub>c</sub>	Courant traversant le condensateur
I <sub>res</sub>	Courant ondulé par le convertisseur DC-AC du coté réseau
I <sub>bt</sub>	Courant de sorti du hacheur
I <sub>ond</sub>	Courant d'entrée de l'onduleur
R <sub>f</sub> , L <sub>f</sub>	Résistance et l'inductance du filtre
V <sub>in</sub>	Tensions simples du réseau
I <sub>ti</sub>	Courants à travers le filtre
C <sub>ST</sub>	Conditions standards
3 $\Phi$	Triphasé



# Liste des figures

## Chapitre 1 : Généralités sur L'énergie Photovoltaïque PV

Figure 1.1:Le rayonnement solaire [10].	9
Figure 1.2:Analyse spectrale du rayonnement solaire [12].	10
Figure 1.3:Composants du rayonnement solaire.	11
Figure 1.4:Fonctionnement et principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque.	12
Figure 1.5 : Influence de l'association des cellules en série sur la caractéristique d'un module photovoltaïque.	14
Figure 1.6 : Influence de l'association des cellules en parallèle sur la caractéristique d'un module photovoltaïque.	15
Figure 1.7 : Caractéristiques courant-tension pour différents assemblages de modules photovoltaïques (PV) en parallèle ou série [18].	16

## Chapitre 2 : Convertisseurs Statique de L'Electronique

### des Puissances

Figure 2.1 : Réversibilité (et non réversibilité) des convertisseurs statiques [24].	21
Figure 2.2 : Représentation symbolique pour le MOSFET et IGBT	22
Figure 2.3 : Caractéristique des interrupteurs de puissance [25].	23
Figure 2.4 :Tension de commande du commutateur durantune période de commutation. [28]	24
Figure 2.5 :Schéma de convertisseur Boost.	24
Figure 2.6 :Circuit équivalent pour $T_{on}$ .	25
Figure 2.7 :Circuit équivalent pour $T_{Off}$	26
Figure 2.8 : Forme du courant $i_1$ et $i_2$	27
Figure 2.9 :Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Boost [26].	28
Figure 2.10 :Schéma électronique de convertisseur abaisseur Buck	29
Figure 2.11 :Convertisseur Buck Durant l'état On	29
Figure 2.12 :Convertisseur Buck durant l'état Off	30
Figure 2.13 :Caractéristique de la tension et des courants dans le transistor et l'inductance d'un convertisseur Buck.[26].	31

Figure 2.14 :Schéma de convertisseur inverseur Buck-Boost.....	32
Figure 2.15 :Convertisseur Buck-Boost Durant l'état On.....	33
Figure 2.16 :Convertisseur Buck-Boost Durant l'état Off.....	33
Figure 2.17 :Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Buck-Boost[26] .....	34
Figure 2.18 :Schéma d'un hacheur parallèle (boost) raccordé au générateur photovoltaïque.....	35
Figure 2.19 : Structure d'un onduleur triphasée.....	38
Figure 2.20 :Plusieurs modules PV en série vers un seul onduleur [36]. .....	38
Figure 2.21 :Bus à basse tension alternative [36]· .....	39
Figure 2.22 : Contrôle de courant par hystérésis [37]. .....	40
Figure 2.23 : Commande des interrupteurs par hystérésis [38]. .....	40
Figure 2.24 : Contrôle de courant par MLI [37]. .....	41
Figure 2.25 : Commande des interrupteurs par MLI [38] .....	41

### **Chapitre 3 : *Commande de maximisation de puissance MPPT***

Figure 3 .1 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.....	46
Figure 3 .2 : Schéma de converge vers le PPM par P&O.....	48
Figure 3 .3 : Organigramme de l'algorithme perturbation et observation.....	49
Figure 3.4 : Programme et schéma block de la technique PO sous MATLAB /SIMULINK .....	50
Figure 3 .5 : Organigramme de l'algorithme de l'incrémentale de la conductance .....	51
Figure 3 .6 : Trajectoire par incrémentation de conductance [40]. .....	52
Figure 3.7: Programme et schéma bloc de la technique INC sous MATLAB /SIMULINK.....	53

### **Chapitre 4 : *Simulation et leur Performance de convertisseur de puissance au PV connecté Au réseau***

Figure 4.1 : Modélisation d'un système photovoltaïque-réseaux électrique(a)Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost (b)Technique du système PV raccordé au réseau.....	57
Figure 4.2: Schéma block d'un convertisseur survolteur sous Matlab/Simulink. ....	59
Figure 4.3 : Résultats de simulation de la valeur de la tension de sortie du hacheur survolteur. ....	60
Figure 4.4: Résultats de simulation de la valeur du courant de sortie du hacheur survolteur. ....	60
Figure 4.5 : Résultats de simulation de la valeur de la puissance de sortie du hacheur survolteur .....	61

Figure 4.6: Schéma bloc de la simulation d'un système PV avec la commande MPPT sous Matlab/Simulink .....	62
Figure 4.7 : Schéma block de la commande MPPT« perturbation-observation » sous Matlab/Simulink. ....	63
Figure 4.8: Schéma bloc de la commande MLI sous Matlab/Simulink. ....	63
Figure 4.9: Résultats de simulation de la tension générée par le générateur photovoltaïque pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C+273.15$ . ....	65
Figure 4.10 : Résultats de simulation du courant généré par le générateur photovoltaïque pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C+273.15$ .....	65
Figure 4.11 : Résultats de simulation de la puissance générée par le générateur photovoltaïque pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C+273.15$ .....	66
Figure 4.12: Résultats de simulation de la tension de sortie du système pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C+273.15$ .....	66
Figure 4.13 : Résultats de simulation du courant de sortie du système pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C+273.15$ .....	67
Figure 4.14 : Résultats de simulation de la puissance de sortie du système pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C+273.15$ .....	67
Figure 4.15: Résultats de simulation de la tension générée par le générateur .....	68
photovoltaïque pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C+273.15$ .....	68
Figure 4.16: Résultats de simulation du courant généré par le générateur .....	69
photovoltaïque pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C+273.15$ .....	69
Figure 4.17: Résultats de simulation de la puissance générée par le générateur photovoltaïque pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C+273.15$ .....	69
Figure 4.18 : Résultats de simulation de la tension de sortie du système pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C+273.15$ .....	70
Figure 4.19 : Résultats de simulation du courant de sortie du système pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C+273.15$ .....	70
Figure 4.20 : Résultats de simulation de la puissance de sortie du système pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$ .....	71
Figure 4.21 : Simulation d'onduleur commandé MLI .....	72
Figure 4.22 : Model du Simulation Onduleur triphasé commande MLI Matlab/SimPowerSystem. ...	73
Figure 4.23 : Model du schéma block global de simulation d'un système photovoltaïque adapté par l'MPPT et connecté au réseau électrique sous Matlab/Simulink .....	74
Figure 4.24 : Résultats de simulation du courant de sortie onduleur du système PV courbe de courant entre une seule phase de réseau .....	76
Figure 4.25 : Résultats de simulation de la tension sortie onduleur du système PV courbe de tension entre une seule phase de réseau. ....	76
Figure 4.26 : Résultats de simulation du courant de réseau électrique 3 $\Phi$ .....	77
Figure 4.27 : Résultats de simulation de la tension de réseau électrique 3 $\Phi$ . ....	77
Figure 4.28 : Déphasage de courant et tension entre une seule phase de réseau. ....	78

Figure 4.29 : La tension de ligne de la charge.....	78
Figure 4.30 : Spectre de la tension de la charge.....	79
Figure 4.31: Le courant de ligne de la charge.....	79
Figure 4.32 : Spectre du courant de la charge.....	79

# *Liste des tableaux*

## **Chapitre 1 : Généralités sur L'énergie Photovoltaïque PV**

Tableau 1.1 : différent les types des cellules[14]. .....	13
---	----

## **Chapitre 2 : Convertisseurs Statique de L'Electronique des Puissances**

Tableau. 2.1 : Comparaison les principaux convertisseurs DC-DC .....	35
--	----

## **Chapitre 3 : Commande de maximisation de puissance MPPT**

Tableaux 3.1 : Classification des différentes méthodes de poursuite du PPM. ....	48
--	----

## **Chapitre 4 : Simulation et leur Performance de convertisseur de puissance au PV connecté Au réseau**

Tableau 4.1 Exemple des paramètres de la simulation de hacheur survolteur. ....	59
Tableau 4.2 : la variation de la puissance para port la charge avec MPPT .....	64
Tableau 4.3 : la variation de la puissance para port la charge sons MPPT.....	64

# *Introduction Générale*

## *Introduction Générale*

La production d'énergie est un défi de grandes importances de la consommation mondiale de cette source d'énergie fossile, fissile et renouvelable pour les années à venir. La plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire.

La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution, un bouleversement climatique et des catastrophes naturelles notables. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part.

Ce constat associé au souci croissant de protection de notre environnement entraîne une montée en puissance des énergies renouvelables, en particulier solaires et éoliennes, justement pour la production d'électricité renouvelables. En revanche, cette production se caractérise par un coût important, un rendement relativement faible et une intermittence de la ressource ayant un comportement aléatoire.

L'énergie photovoltaïque, basée sur la conversion du rayonnement électromagnétique solaire en électricité, représente l'une des ressources énergétiques renouvelables à part entière. Ainsi, nous pouvons considérer cette source d'énergie comme une des énergies renouvelables capable de produire de l'électricité en grande quantité sur le long terme sans trop émettre de gaz à

effet de serre. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

La configuration la plus simple un tel système beaucoup d'exigences comme la stabilité du système de puissance et la qualité de puissance sont des demandes primaires par conséquent, grande recherche des efforts sont déployés dans le contrôle de ces systèmes afin d'améliorer leur comportement. Malheureusement cette configuration ne permet pas toujours d'extraire la puissance maximale dont un panneau peut fournir vu que les paramètres météorologiques (ensoleillement et température) varient avec le temps. Cette perte de puissance disponible au niveau du générateur photovoltaïque 'GPV' est en général non puisée par la charge. Une bonne rentabilité du 'GPV' peut être réalisée si celui-ci travaille au maximum de puissance tout le temps. Or, le point de puissance maximum varie selon plusieurs paramètres comme l'éclairement, la température  $T$  et la nature de la charge.

Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été développées pour la poursuite du point de puissance maximale d'un générateur photovoltaïque. Parmi les méthodes les plus utilisées dans les applications photovoltaïques, nous citons la méthode de perturbation et observation (P&O), la méthode d'incrémentation de conductance et la méthode de l'escalade de la colline. Cette dernière se base sur un algorithme très simple ne nécessitant que la tension et le courant du générateur photovoltaïque pour le calcul de la puissance produite. Après une opération de comparaison de cette puissance avec celle stockée en mémoire, la poursuite du point de puissance maximale peut s'effectuer en ajustant le rapport cyclique du convertisseur statique.

Donc, cet algorithme est caractérisé par une facilité d'implémentation sur un microprocesseur ou un microcontrôleur avec un rendement qui peut atteindre 92%. De nouvelles techniques de réduction du nombre de capteurs sont



proposées dans la littérature permettant de faire la poursuite du point de puissance maximale et peuvent être réalisable mais au détriment de la simplicité de l'algorithme implémenté.

Dans ce mémoire, l'implémentation d'électronique de puissance et leur performance d'un système photovoltaïque adapté par une commande basée sur la passivité et l'assignation d'interconnexion et d'amortissement assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque.

Le but de ce manuscrit, est la simulation du comportement d'une station solaire autonome ou connectée au réseau.

L'objectif de ce travail est :

- De contribuer à une meilleure compréhension des performances de convertisseur DC-DC (Hacheur Boost) et des onduleurs DC-AC est couplé à un générateur photovoltaïque et améliorer sa tension de sortie afin d'obtenir une bonne source qu'on peu utiliser comme un générateur d'électricité.
- l'obtention d'une bonne qualité de l'énergie, que ce soit en régime de charge ou en régime de transfert d'énergie dans le réseau.

**Pour ce faire nous avons présenté ce manuscrit en trois chapitres de la façon suivante :**

- Dans *le premier chapitre*, nous avons présenté généralité sur les systèmes photovoltaïques et construction des cellules photovoltaïques et l'effet photovoltaïque et principe de fonctionnement les avantages et inconvénients.
- Dans *le deuxième chapitre* traite de la modélisation et la commande des équipements d'électronique de puissance utilises dans les systèmes photovoltaïques, on étudie quelques types convertisseurs statiques (DC-DC) et (DC-AC) et les différentes méthodes de recherche du point de

puissance maximale ainsi que l'étude de la commande des onduleurs connectés au réseau.

- Dans *le troisième chapitre*, on étudie quelques types les méthodes de la commande MPPT.
- Dans *le quatrième chapitre*, nous avons étudié et simulé différents convertisseurs DC-DC et des onduleurs cités dans le chapitre 2, et montré le rôle et leur performance du mécanisme MPPT et simulé le système PV complet connecté au réseau électrique.

*Enfin*, ce travail est terminé par conclusion générale.

# *Chapitre 1 :*

*Généralités sur L'énergie  
Photovoltaïque PV*

## **1. Introduction**

Ce chapitre consiste à la description générale sur les énergies renouvelables, l'énergie solaire ainsi que le fonctionnement physique d'une cellule photovoltaïque.

### **1.1 Des énergies renouvelables :**

#### **1.1.1 Définition des énergies renouvelables**

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables, c'est-à-dire, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation, elles sont issues des éléments naturels provoqués par : le vent, le soleil, les chutes d'eau, les marées, la chaleur de la terre, la croissance des végétaux, la lune, pour des phénomènes naturels comme : l'énergie solaire, éolienne, hydraulique et la biomasse, géothermique profonde. Ce sont des énergies de l'avenir [1].

#### **1.1.2 Les types d'énergies renouvelables:**

Les différents types d'énergies renouvelables sont [2]:

##### **1. L'énergie hydraulique :**

La force de l'eau des chutes retenue par des barrages ou celle qui alimente les aménagements "au fil de l'eau" fait tourner les turbines des centrales pour produire de l'électricité.

##### **2. L'énergie éolienne :**

La force du vent fait tourner des éoliennes qui produisent de l'électricité.

##### **3. L'énergie solaire :**

Les rayons du soleil chauffent l'eau grâce à des capteurs solaires ou fournissent de l'électricité grâce à des cellules photovoltaïques ou des centrales solaires.

##### **4. L'énergie de la géothermie :**

La chaleur du sous-sol chauffe directement l'eau ou fait tourner les turbines des centrales pour produire de l'électricité.

## 5. L'énergie de la biomasse :

La combustion de la matière organique (plantes, arbres, déchets animaux, agricoles ou urbains) produit de la chaleur ou de l'électricité.

## 6. Les énergies marines :

Les flux naturels d'énergie des eaux marines et de la matière marine sont utilisés pour produire de l'électricité. La force des marées fait tourner les turbines des centrales pour produire de l'électricité.

### 1.1.3 Définition et Historique photovoltaïque:

#### 1.1.3.1 Définitions :

**Déf 1 :** Le terme « *photovoltaïque* », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « *photo* », un mot grec signifiant lumière, et « *Volta* », le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité [2].

**Déf 2:** Le système photovoltaïque SPV est constitué par une source d'énergie (générateur photovoltaïque), une interface de puissance (les convertisseurs statiques (*DC-DC* : *Direct current-Direct current*) et (*DC-AC* : *Direct current- Alternating current*) avec un système de commande) et une charge. Le rôle principal du convertisseur statique est de faire une adaptation d'impédance de sorte que le générateur délivre le maximum d'énergie [3].

#### 1.1.3.2 Histoire :

Quelques dates importantes [4-5] :

- **1839** : Antoine Becquerel publie un mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires relatives à une expérience menée par son fils Edmond avec une pile constituée par des électrodes de

platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide. Cette pile est capable de fournir un courant.

- **1877** : W. G. Adams et R. E. Day découvrent l'effet photovoltaïque du sélénium, et C. Fritts met au point le premier panneau photovoltaïque à base de cellules au sélénium.
- **1905** : Albert Einstein publie un article sur l'effet photoélectrique, c'est pour quoi il obtient un prix Nobel en 1921.
- **1954** : D. M. Chapin, C. S. Fuller et G. L. Pearson, deux ingénieurs des Bell Téléphone Laboratoires (États-Unis), annoncent d'une cellule photovoltaïque pour l'industrie spatiale est mise au point dont le rendement de conversion énergétique atteint 6 %, marquant ainsi véritablement la naissance de l'électricité photovoltaïque.
- **1959** : les États-Unis mettent en orbite Vanguard, Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires envoyées dans l'espace.
- **1970** : les crises pétrolières renforcent l'intérêt et les crédits accordés à l'énergie photovoltaïque
- **1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000km en Australie.
- **1995** : premières installations photovoltaïques raccordées au réseau en Allemagne et au Japon.
- **2002** : l'amélioration du rendement de conversion et la réduction des coûts de production, le marché photovoltaïque s'est considérablement développé, le photovoltaïque représente moins de 0,1 % de toute la production énergétique mondiale [6].
- **2010 à 2016** : la puissance installée du parc photovoltaïque mondial a été multipliée par 6 entre fin 2010 (50 GW) et fin 2016 (305 GW) [7-8].

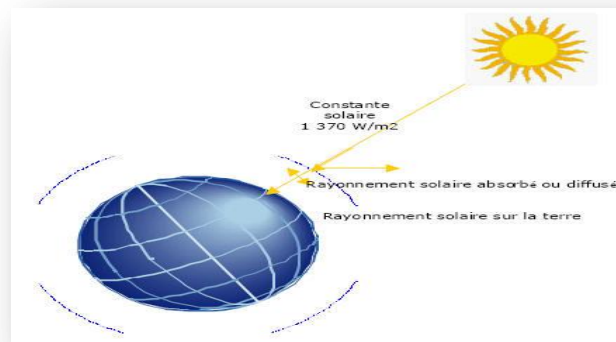
#### 1.1.4 L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable qui produit de l'électricité par la transformation du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Ces derniers sont regroupés et sont appelés champ photovoltaïque [9].

##### 1.1.4.1 L'énergie solaire :

Ce que l'on dénomme, l'énergie solaire, est en fait la somme des rayonnements électromagnétiques qu'envoie le soleil. Et plus particulièrement, la partie de ce rayonnement qui impacte la terre. Il est source de lumière, de chaleur,... de vie.

La puissance thermique qui est envoyée de cette manière par le soleil est constante et vaut  $1370 \text{ W/m}^2$ . On l'appelle la constante solaire (Figure 1.1). Mais cette puissance n'est pas directement utilisable, car une partie seulement de ce rayonnement arrive directement à la surface de la terre. Une autre partie de ce rayonnement est soit absorbée par l'atmosphère soit diffusée. Ce qui fait qu'à la surface de la terre nous pouvons récolter une partie seulement de ce rayonnement direct et du rayonnement diffus ainsi que du rayonnement réfléchi (par le sol ou tout autre objet situé sur la terre).



**Figure 1.1:**Le rayonnement solaire [10].

#### 1.1.4.2 Le spectre du rayonnement :

L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde  $\lambda$  ou plus la longueur d'onde courte, plus l'énergie du photon est grande comme indique la relation suivante [11]:

$$E_{\text{ph}} = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Ou :  $h$  est la constante de Planck

$c$  est la vitesse de la lumière

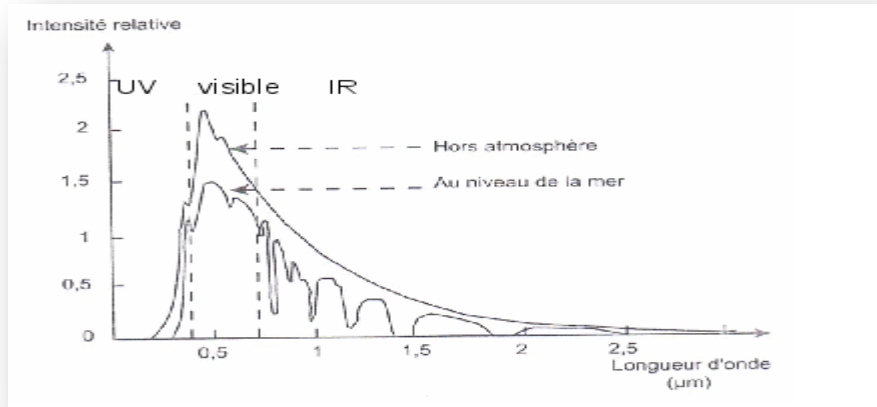
$\lambda$  est la longueur d'onde

Avec :

- $E$  (J) : énergie en Joule;
- $h$  (J.s) : constante de Planck ( $h = 6,62607004 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$ );
- $c$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) : vitesse de la lumière ( $c = 299\,792\,458 \text{ m} / \text{s}$ );
- $\lambda$  (m) : longueur d'onde (souvent exprimée en micromètre);
- $\nu$  (Hz) : fréquence.



La figure (1.2) représente la variation de la répartition spectrale énergétique.  
L'énergie associée



**Figure 1.2:** Analyse spectrale du rayonnement solaire [12].

Elle nous donne la distribution en énergie du spectre solaire :

- Ultraviolet UV  $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$  6.4%.
- Visible  $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$  48.0%.
- Infrarouge IR  $0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$  45.6%

#### 1.1.4.3 Les types du rayonnement :

Il y a différents types de rayonnement sont :

- **Rayonnement direct** : Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant du soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.
- **Rayonnement diffus** : C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi de multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère.
- **Rayonnement solaire réfléchi (ou l'albédo)** du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets qui se trouvent

à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

- **Rayonnement global** : Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions.

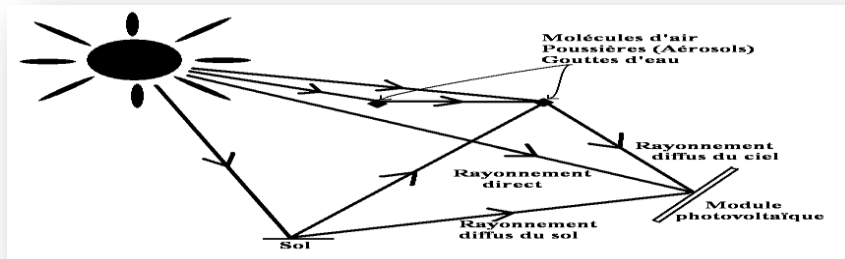


Figure 1.3: Composants du rayonnement solaire.

### 1.1.5 L'effet photovoltaïque :

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable à travers un matériau semi-conducteur appelé cellule photovoltaïque [13].

#### 1.1.5.1 La cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs de type P-N qui produisent un courant électrique sous l'effet des photons lumineux. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

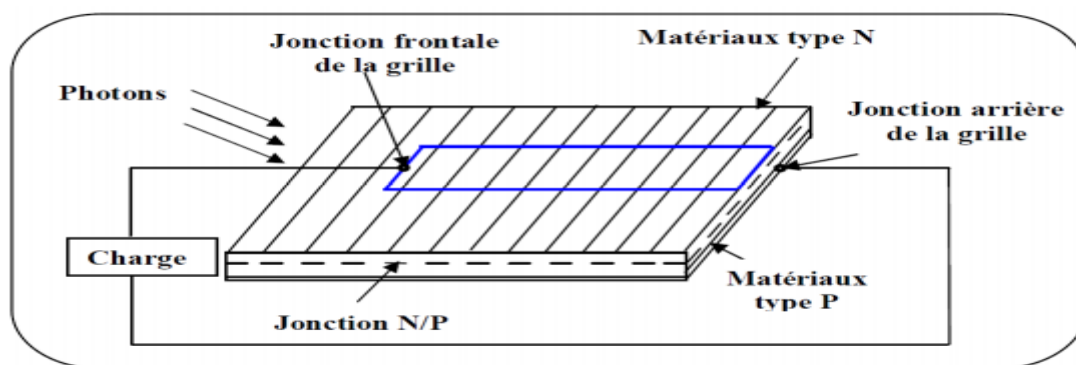
- Absorption des photons par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur.

- Collecte des particules générées dans le dispositif.

### 1.1.5.2 Principe de la conversion photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

La figure (1.4) illustre une cellule PV typique.



**Figure 1.4:** Fonctionnement et principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque.

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au Bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore), créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par les semi-conducteurs, ils transmettent leurs énergies aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons (charges N) et des trous (charges P) créent alors une différence de potentiel entre les deux couches.

### 1.1.6 Technologie des cellules solaires :

#### 1.1.6.1 Les types des cellules :

Elles peuvent être classées les différents types de cellules solaires PV sont existants dans l'industrie le tableau (1.1) représenté les types des cellules comme suite [14-15]


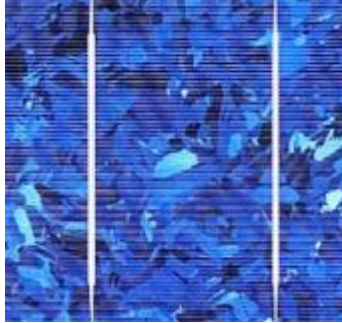

Technologie	silicium Monocristallines	silicium Poly-cristallines	silicium Amorphe
Caractéristiques solaires PV			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Très bon rendement 14 à 20.%</li> <li>- Durée de vie : importante (30 ans)</li> <li>- Coût de fabrication élevé</li> <li>- Puissance : 100 à 150 Wc/m2. 7 m2/kWc.</li> <li>-Rendement faible sous un faible éclairement.</li> <li>- perte de rendement avec l'élévation de la température .</li> <li>- Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant- un seul cristal</li> <li>-Couleur bleue uniforme.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bon rendement : 11 vâ 15.%</li> <li>-Durée de vie : importante (30 ans)</li> <li>-Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins</li> <li>-Puissance : 100 Wc/m2. 8 m2/kWc.</li> <li>- Rendement faible sous un faible clairement.-</li> <li>perte de rendement avec l'élévation de la température.</li> <li>- Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux.</li> <li>- Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés par les différents cristaux.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Rendement faible : 5 à 9.%</li> <li>- Durée de vie : assez importante (20 ans)</li> <li>- Coût de fabrication peu onéreux par rapport aux autres technologies</li> <li>-Puissance : 50 Wc/m2. 16 m2/kWc .</li> <li>- Fonctionnement correct avec un éclairement faible.</li> <li>- Peu sensible aux températures élevées .</li> <li>- Utilisables en panneaux souples .</li> <li>- Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium .</li> <li>- Rendement faible en plein soleil.</li> <li>- Fabrication : couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide</li> </ul>
	Part de marché 43 %	Part de marché 47 %	Part de marché 10 %
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Bon rendement</li> <li>-Nombre de fabricants élevé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Très bon rendement</li> <li>-Moins cher que le monocristallin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Fonctionnement avec un éclairement faible</li> <li>-Un peu moins chère</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cout élevé</li> <li>-Rendement plus faible sous un faible éclairement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Rendement faible sous faible éclairement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Rendement faible en plein soleil</li> <li>-Diminution des performances avec le temps</li> </ul>

Tableau 1.1 : différent les types des cellules[14].

**1.1.7 Associations module photovoltaïque :**

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un module ou générateur photovoltaïque (GPV) aux caractéristiques souhaitées [16]

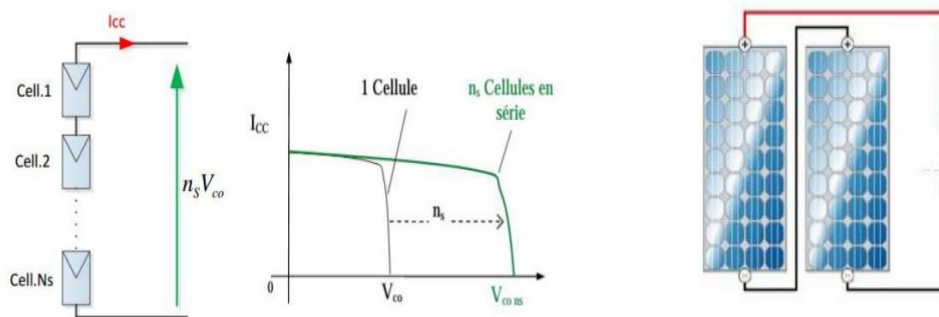
**A) Association en série (appelée "String") :**

Les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules. Les équations (1.2) et (1.3) résument les caractéristiques électriques d'une association en série de  $n_s$  cellules :

$$V_{CO,n_s} = n_s V_{co} \tag{1.2}$$

$$I_{CC,n_s} = I_{CC} \tag{1.3}$$

Où  $I_{CC}$  est le courant court-circuit et  $V_{CO}$  la tension de circuit ouvert.



**Figure 1.5 :** Influence de l'association des cellules en série sur la caractéristique d'un module photovoltaïque.

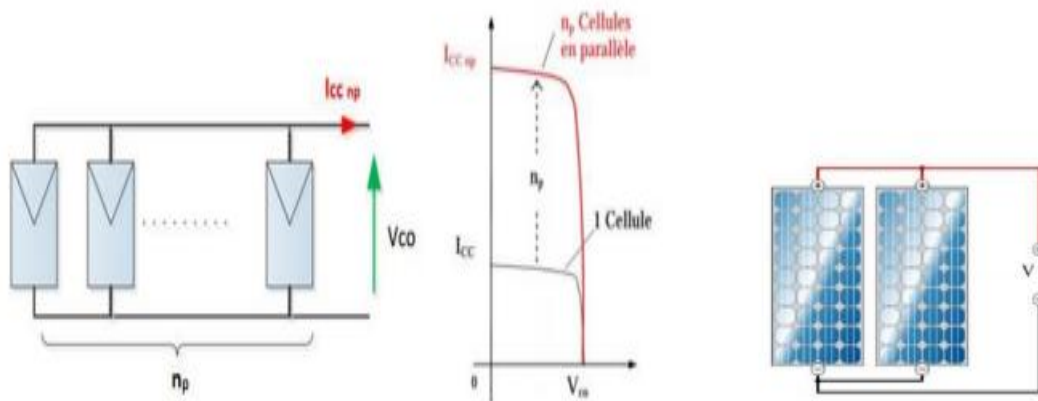
**B) association en parallèle**

Dans une association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules.

Les équations (1.4) et (1.5) résument les caractéristiques électriques d'une association en parallèle de  $n_p$  cellules :

$$I_{CC,n_p} = n_p I_{CC} \tag{1.4}$$

$$V_{CO,n_p} = V_{co} \tag{1.5}$$



**Figure 1.6 :** Influence de l'association des cellules en parallèle sur la caractéristique d'un module photovoltaïque.

**C) Association mixte (série-parallèle) :**

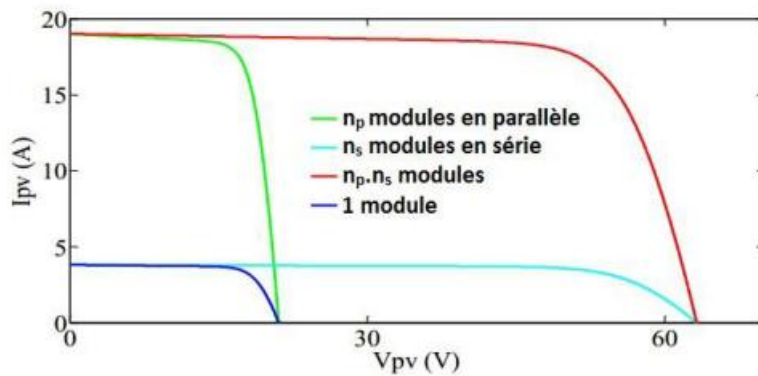
Les caractéristiques globales d'une installation se déduisent donc d'une combinaison des caractéristiques des constituants des  $n_s \times n_p$  (cellules x cellules). La caractéristique d'un générateur constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule et que l'ensoleillement et la température soient uniformes [17].

La Figure 1.7 présente la caractéristique d'un module et d'un générateur composé de  $n_p$  modules en parallèle et de  $n_s$  modules en série.

Les équations (1.6) et (1.7) résument les caractéristiques électriques d'une association  $n_s * n_p$  (cellules x cellules) :

$$I_{CC} = \sum_{n_p} I_{CC_i} \quad (1.6)$$

$$V_{CO} = \sum_{n_s} V_{CO_i} \quad (1.7)$$



**Figure 1.7 :** Caractéristiques courant-tension pour différents assemblages de modules photovoltaïques (PV) en parallèle ou série [18].

### 1.1.8 Caractéristiques d'un module photovoltaïque :

Un GPV élémentaire (peut être un seul panneau) décrit par les paramètres suivants [19-20]:

- **La puissance de crête  $P_c$**  : puissance nominale délivrée par le module dans les conditions standards (25 °C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>). Elle s'exprime en Watt crête (Wc).
- **La caractéristique  $I(V)$**  : courbe représente le courant  $I$  débit par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **La tension à vide  $V_{oc}$**  : tension aux bornes du module en absence de tout courant, pour un éclairement « plein soleil ».

- **Le courant de court-circuit  $I_{sc}$** : courant dériver par un module en court-circuit pour un éclairement « plein soleil ».
- **Le point de fonctionnement optimum (point de puissance maximale)** : il est en fonction de l'insolation. C'est le point pour lequel le module fournit son maximum du courant  $I_{mpp}$  sous sa tension maximale  $V_{mpp}$  (lorsque la puissance de crête est maximale en plein soleil :

$$P_{mpp} = V_{mpp} * I_{mpp} \quad (1.8)$$

- **Le rendement** : rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente ; Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite  $P_{mpp}$  et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit  $(S)$  la surface du module soit  $(G)$  l'éclairement, ce rendement a pour expression :

$$\mu = \frac{P_{mpp}}{G * S} \quad (1.9)$$

- **Le facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale  $P_{mpp}$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule ( $V_{oc} \cdot I_{sc}$ ) [14].

$$FF = \frac{P_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{V_{mpp} * I_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1.10)$$

## 1.2 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit [21]:



**A) Les avantages :**

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages à savoir :

- Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, elles demandent peu d'entretien.
- le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.
- Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt.
- le coût de fonctionnement est faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni personnel hautement spécialisé.
- 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.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

**B) Les inconvénients :**

- la fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont 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 puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- 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 [22].

### **1.3 Conclusion :**

Ce chapitre s'est consacré à présenter les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système photovoltaïque. nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, l'énergie solaire et l'énergie photovoltaïque .Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que leur type avec à la fin un aperçu l'avenir du photovoltaïque.

Dans le troisième chapitre, on s'intéressera à la présentation d'une étude sur convertisseurs de puissance statique.

# *Chapitre 2 :*

*Convertisseurs Statique de  
L'Electronique des Puissances*

## 2. Introduction :

L'Electronique de Puissance ou électronique de commutation, a pour vocation de maîtriser le transfert d'énergie entre une source et une charge, en assurant une conversion à haut rendement. Pour cela, des semi conducteurs sont utilisés en interrupteurs, et associés à des composants passifs. Cette conversion statique moderne d'énergie forte attrayante s'est répandue dans de nombreux domaines, couvrant des gammes de puissances extrêmement étendues.

Dans ce chapitre, nous allons étudier les convertisseurs des puissances, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Nous y présentons d'abord le fonctionnement des convertisseurs électriques des puissances continu-continus (DC-DC) et continu-Alternatif (DC-AC). Ensuite, On va décrire la commande MPPT et la commande MLI.

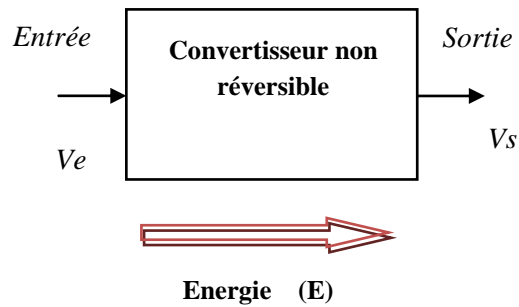
### 2.1. Les convertisseurs statiques :

#### 2.1.1 Définition :

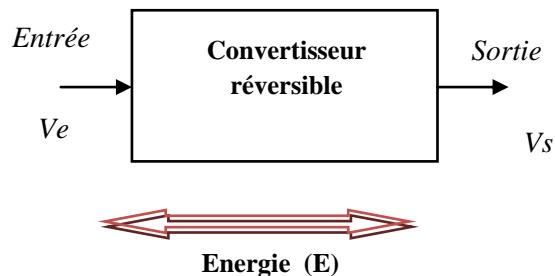
Un convertisseur statique est un dispositif, à base de semi-conducteurs, qui transforme de l'énergie électrique disponible, en une forme appropriée pour alimenter une charge.

#### 2.1.2 Fonctions de base et terminologie des convertisseurs statiques :

Il existe quatre fonctions de base des convertisseurs statiques. Ces convertisseurs transforment directement l'énergie électrique, sont appelés mono-étages, Un convertisseur statique est dit réversible lorsque l'énergie, peut transiter de manière bidirectionnelle, c'est à dire aussi bien dans un sens que dans l'autre. Un convertisseur non réversible transfère l'énergie d'une source vers une charge utilisatrice [23-24].



(a) Convertisseur statique de puissance réversibilité .



(b) Convertisseurs statiques non réversibilité.

**Figure 2.1** : Réversibilité et non réversibilité des convertisseurs statiques [24].

### 2.1.3 Les différents convertisseurs :

Les différents types des convertisseurs de puissance sont :

- 1- Les convertisseurs alternatif/alternatif (AC => AC), exemple : Gradateur.
- 2- Les convertisseurs continues/continues (DC => DC), exemple : Hacheurs.
- 3- Les convertisseurs continues/alternatifs (DC => AC), exemple: Onduleurs.
- 4- Les convertisseurs continues/alternatifs (AC=>DC), exemple : Redresseurs.

Nous nous intéressons dans ce chapitre à la modélisation des hacheurs ainsi les onduleurs.

## 2.2 Convertisseurs continu-continu (DC/DC) ou les hacheurs :

Les convertisseurs continu-continu (DC-DC) ou les hacheurs, son fonctionne sur la transmission d'énergie d'une source de courant vers une source de tension à l'aide de la commutation de deux composants, qui sont basée sure le choix de types de transistors sont (MOSFET, IGBT) sa fonctionne de principe d'interrupteur K et la diode D.

### 2.2.1 Choix des composants de commutateurs

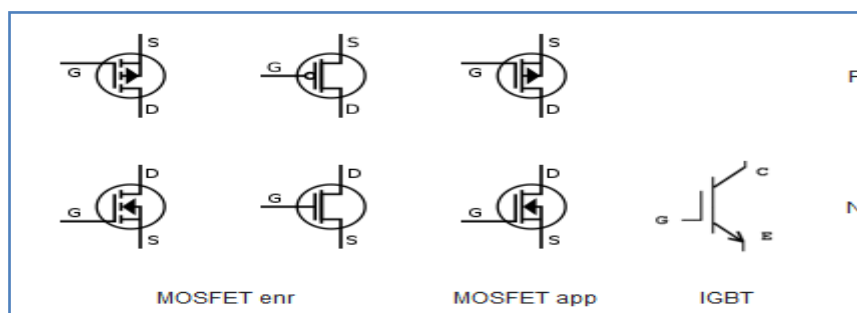
#### 2.2.1.1 Choix de la diode :

La diode utilisée doit être extrêmement rapide. Des pertes par recouvrements inverses sont générées par ses diodes, en conséquence, plus elles seront rapides, moins il y aura des pertes.

#### 2.2.1.2 Choix du transistor :

Un transistor à effet de champ est un composant à trois broches : la Grille, le Drain et la Source. On considère que la commande du transistor se fait par l'application d'une tension  $V_{GS}$  négative dans le cas d'un type P, positive dans le cas d'un type N.

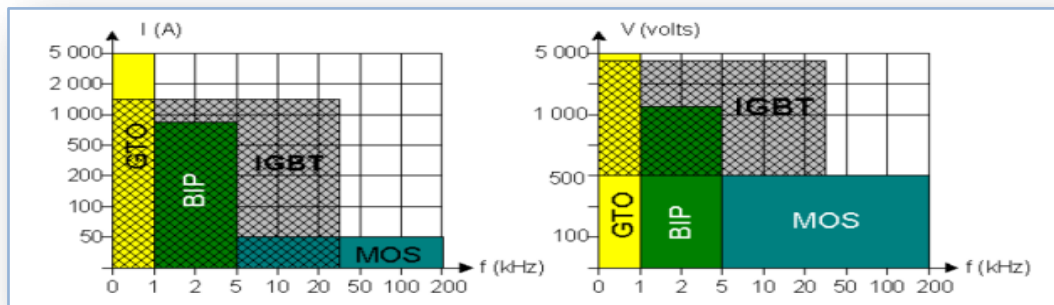
La figure 2.2, représente deux types de transistors sont (MOSFET et IGBT)



**Figure 2.2 :** Représentation symbolique pour le MOSFET et IGBT.

Le choix de l'interrupteur ou transistor de puissance se fait selon des différents facteurs comme la fréquence et la puissance.

On constate que les transistors IGBT's supportent des grandes valeurs de tension et de courant qui peuvent atteindre jusqu'à 1500A et 4500V sous une fréquence de 35 KHz, Contrairement au les transistors MOSFET's qui atteint 50A et 500V. Du point de vue fréquence, le transistor MOSFET a tendance à opérer dans des hautes fréquences (200 KHz) [25].



**Figure 2.3 :** Caractéristique des interrupteurs de puissance [25].

### 2.2.2 Convertisseur Boost :

Un convertisseur continue/continue Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage permettant d'augmenter la tension fournie et diminuer ainsi, le nombre d'éléments nécessaires pour atteindre le niveau de tension désiré.

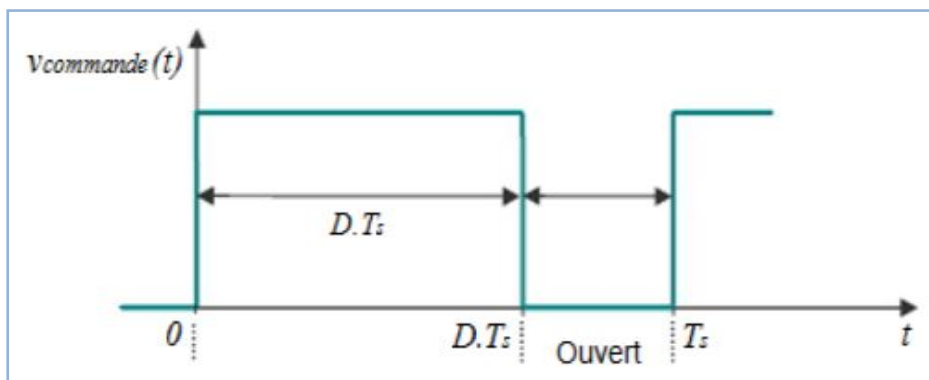
Donc les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur Boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur [26-27].

**a) Schéma du convertisseur Boost :**

Le convertisseur survolteur est le plus populaire des convertisseurs pour les régulateurs de correction du facteur de puissance, il est caractérisé par le fait que de la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Ils se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance dans le cas idéal, c'est pour cette raison que les hacheurs ont de bons rendements.

Le commutateur du convertisseur est commandé par un rapport cyclique  $D$  variable. De la figure (2.4), On ferme le commutateur pendant un temps de fermeture égal à  $D T_s$ , ensuite on l'ouvre durant un temps d'ouverture égal à  $(1-D T_s)$  où :  $D$  est le rapport cyclique du commutateur ( $D \in [0,1]$ ).

La figure (2.4), représente la tension de commande du commutateur durant une période de commutation



**Figure 2.4 :** Tension de commande du commutateur durant une période de commutation. [28]



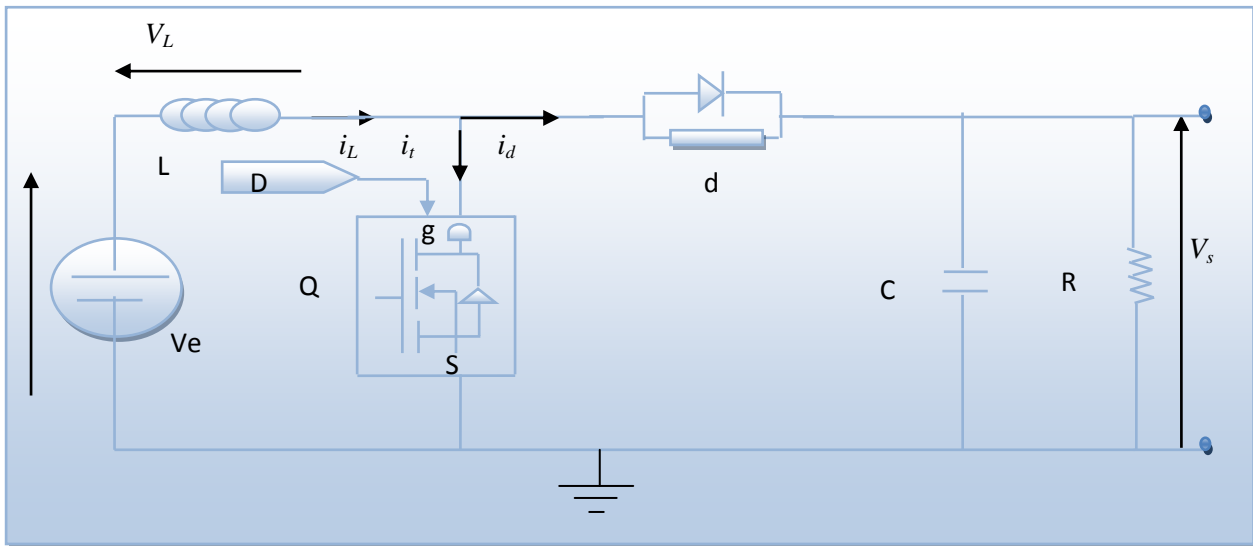


Figure 2.5 : Schéma de convertisseur Boost.

**b) Principe de fonctionnement :**

Le fonctionnement du circuit de convertisseur Boost peut se diviser en deux parties selon l'intervalle de commutation ( $T_{On}$ ,  $T_{Off}$ ).

- **Pour  $T_{On}$  (Q fermé) :** À  $t = 0$ , quand le transistor Q est fermé, l'intervalle  $T_{On}$  commence.

Le courant d'entrée, qui s'élève, traverse l'inductance L et le transistor.

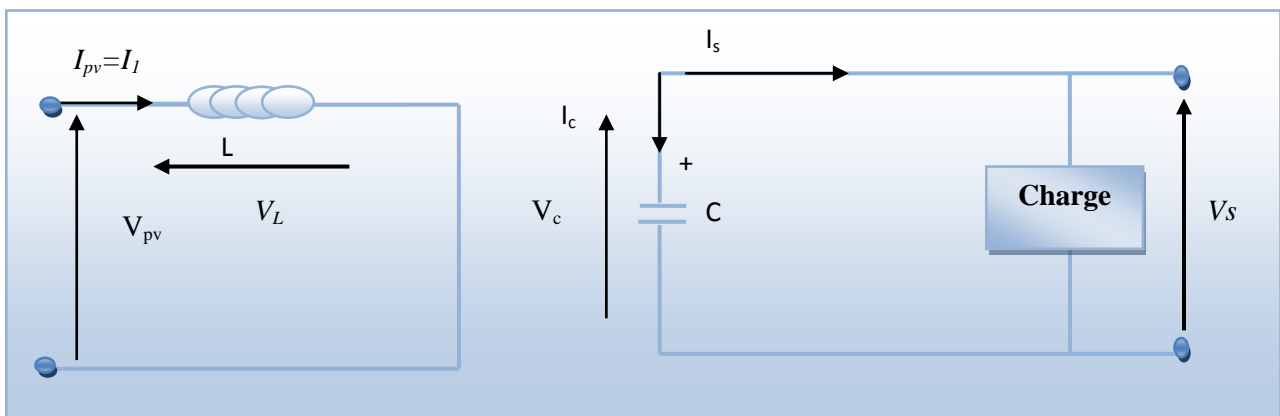


Figure 2.6 :Circuit équivalent pour  $T_{on}$ .

Durant l'état passant, l'interrupteur Q est fermé, l'équation de la tension suivant la relation :

$$V_e = L \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

Avec :

$$V_e = V_{pv} \quad (2.2)$$

le courant  $i_L$  a augmenté selon l'équation(2.3)

$$i_{1L} = \int \frac{V_e}{L} dt \quad (2.3)$$

$$i_{1L} = \frac{\alpha V_e}{L} t \quad (2.4)$$

Où  $i_{1L}$  est le courant à l'instant initial.  $\alpha$  étant le rapport cyclique ( $\alpha$  est compris entre « 0 » (Q ne conduit jamais) et « 1 »(Q conduit tout le temps)). Et T représente la durée de la période pendant laquelle l'interrupteur Q conduit.

**- Pour  $T_{Off}$  (Q ouvert) :** l'intervalle  $T_{Off}$  commence quand on ouvre le transistor Q à  $t = t_1$ . Le courant de l'inductance diminue car l'énergie emmagasinée dans l'inductance  $L$  est transférée à la charge.

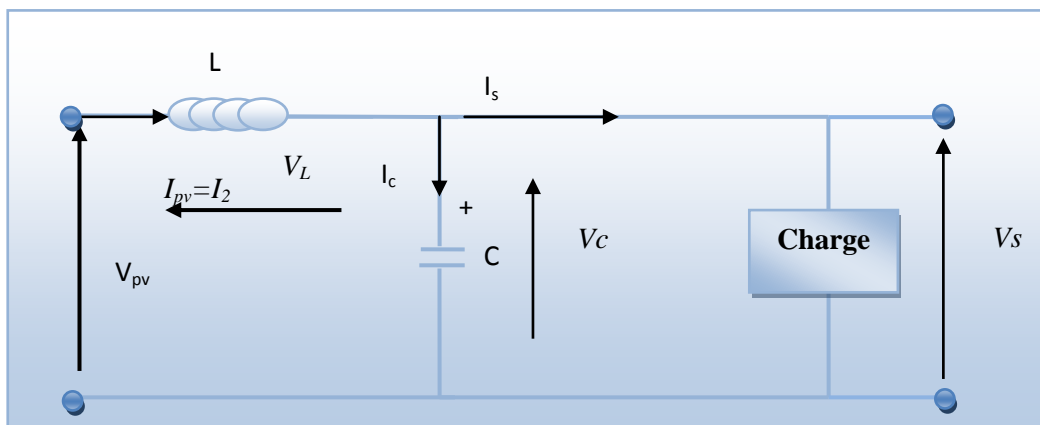


Figure 2.7 :Circuit équivalent pour  $T_{Off}$

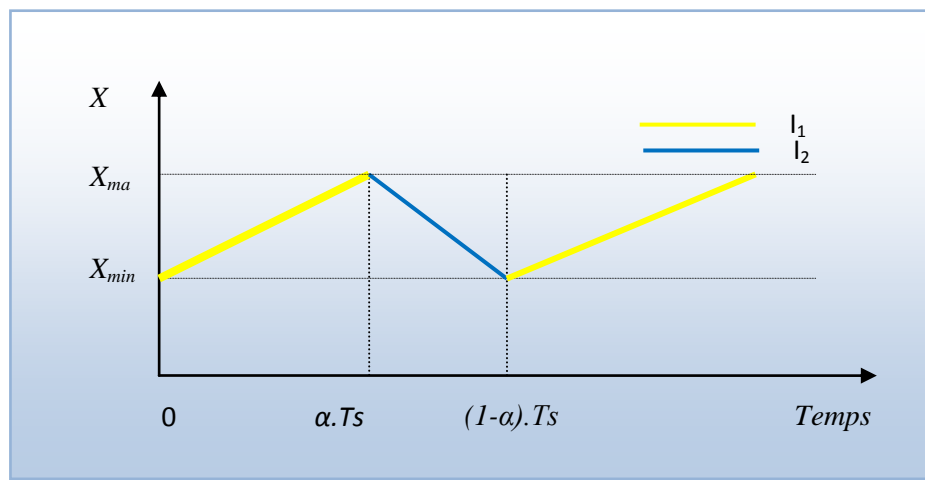
Pendant l'état bloqué, l'interrupteur Q est ouvert, le courant traversant l'inductance circule à travers la charge.

$$V_e - V_s = L \frac{di}{dt} \quad (2.5)$$

Le courant  $i_L$  a diminution selon l'équation (2.6)

$$i_{2L} = \frac{(\alpha-1)(V_e-V_s)}{L} t \quad (2.6)$$

Les deux équations des courants  $i_{1L}$  et  $i_{2L}$  sont interprétées ci-dessous :



**Figure 2.8 :** Forme du courant  $i_1$  et  $i_2$

Le rapport cyclique est [29]:

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T} \quad (2.7)$$

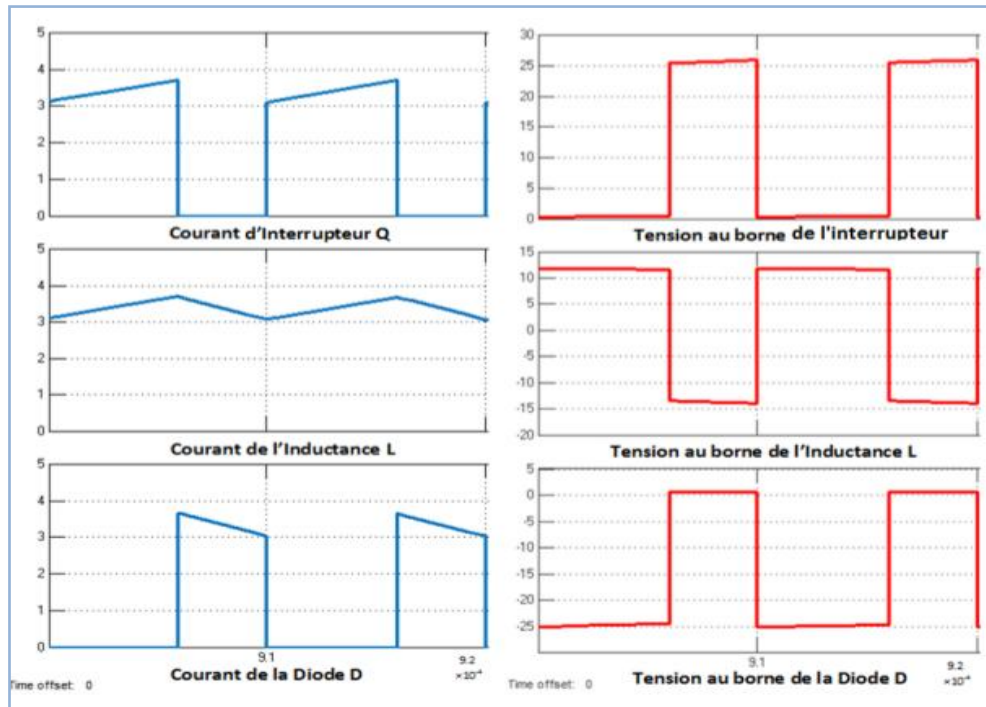
La tension et courant de sortie de survolteur en régime établi suivant la valeur de  $T_{On}$  et  $T_{off}$  selon selon équation [30]. :

$$V_s = \frac{1}{(\alpha-1)} V_e \quad \text{avec } \alpha > 1 \quad (2.8)$$

$$I_s = (\alpha - 1) I_e \quad (2.9)$$

### c) Les caractéristiques de tension et du courant :

La figure (2.9) , représente les caractéristiques de tension et du courant du convertisseur Boost.



**Figure 2.9** :Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur

Boost [26]

### 2.2.3 Convertisseur Buck

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.

#### a) Schéma du convertisseur Buck

L'hacheur dévolteur, sous sa forme de base est présenté par la figure 2.10. Il présente les mêmes composants clés que pour le convertisseur Boost.

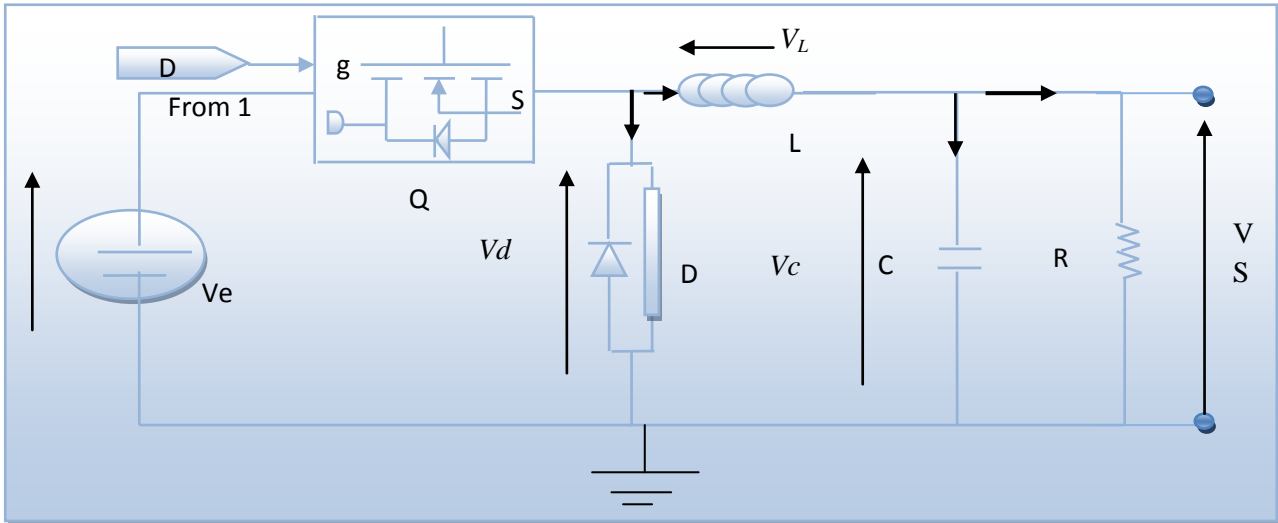


Figure 2.10 : Schéma électronique de convertisseur abaisseur Buck

**b) Principe de fonctionnement :**

La figure (2.11), représente le principe de fonctionnement d'un convertisseur Buck Durant l'état On

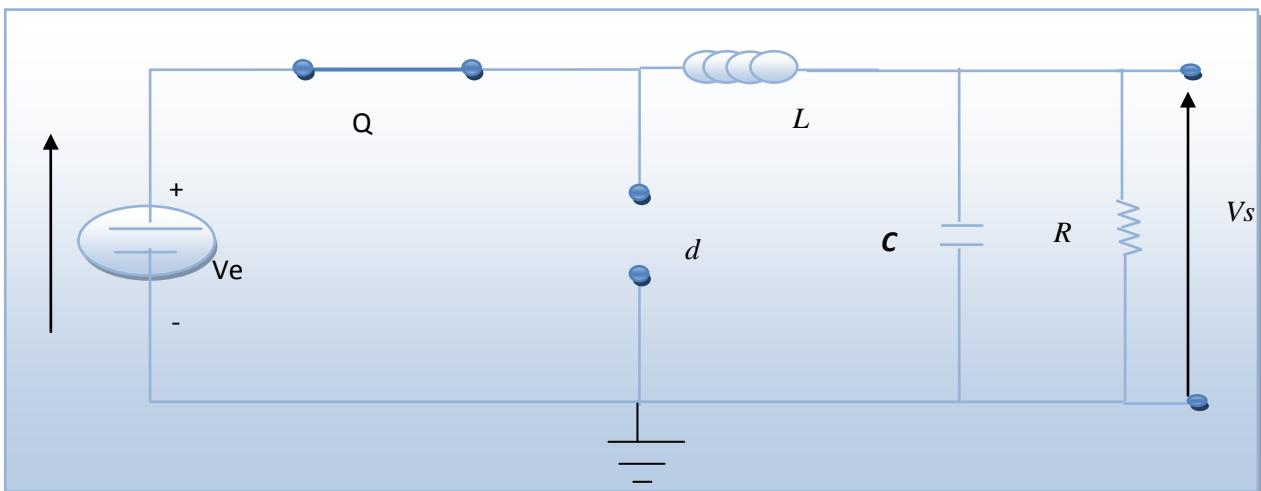


Figure 2.11 : Convertisseur Buck Durant l'état On

Le fonctionnement du circuit de convertisseur Buck peut se diviser en deux modes de fonctionnement (on/off) on a[31] :

**Pour T<sub>off</sub> (Q off) :** les équations des tensions Pour Q fermé, on a les équations des tensions est :

$$V_T = 0 \quad \text{et} \quad V_D = -V_e \quad (2.10)$$

Alors la tension aux bornes de l'inductance sera :

$$V_L = V_e - V_s = L \frac{di}{dt} > 0 \quad (2.11)$$

L'équation du courant :

$$i_L = \frac{V_e - V_s}{L} t + I_{min} \quad (2.12)$$

L'inductance alors emmagasine de l'énergie sous forme magnétique.

- **Pour  $T_{off}$  (Q ouvert)** : Si Q est désactivé après  $t = t_1$ , la charge est déconnectée de son alimentation. Le courant est toutefois maintenu par l'énergie stockée dans l'inductance  $L$  et circule à travers la diode D appelée diode de roue libre.

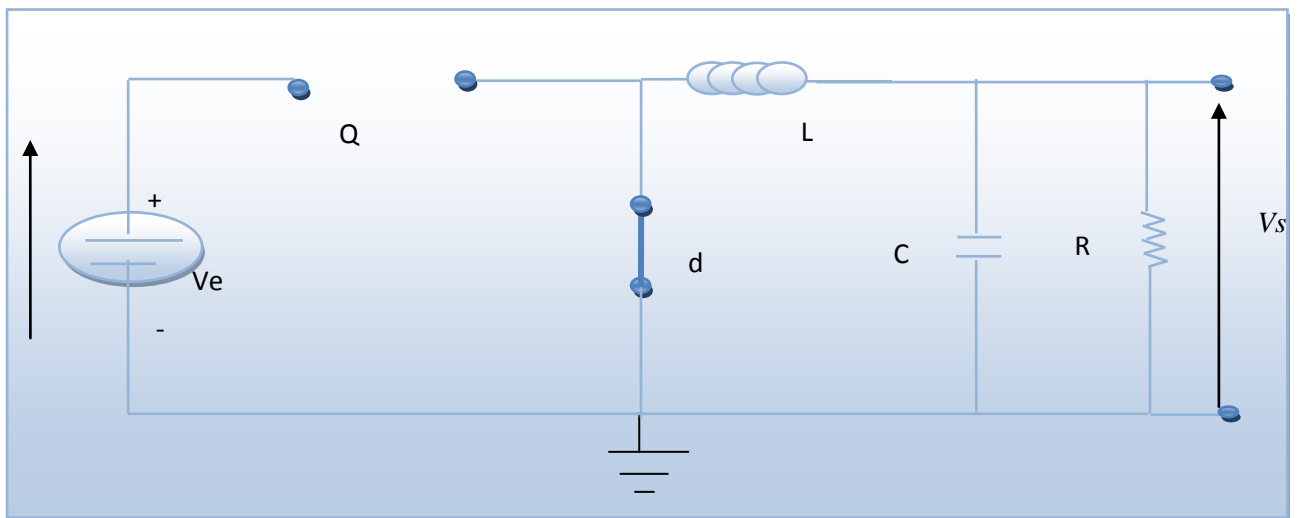


Figure 2.12 : Convertisseur Buck durant l'état Off.

- **Pour  $T_{off}$  (Q ouvert)**, les équations des tensions sont :

$$V_T = V_e \text{ et } V_D = 0 \quad (2.13)$$

Alors la tension  $V_L$  sera :

$$V_L = -V_s = L \frac{di}{dt} < 0 \quad (2.14)$$

L'équation du courant :

$$i_L = \frac{-V_s}{L} t + I_{max} \quad (2.15)$$

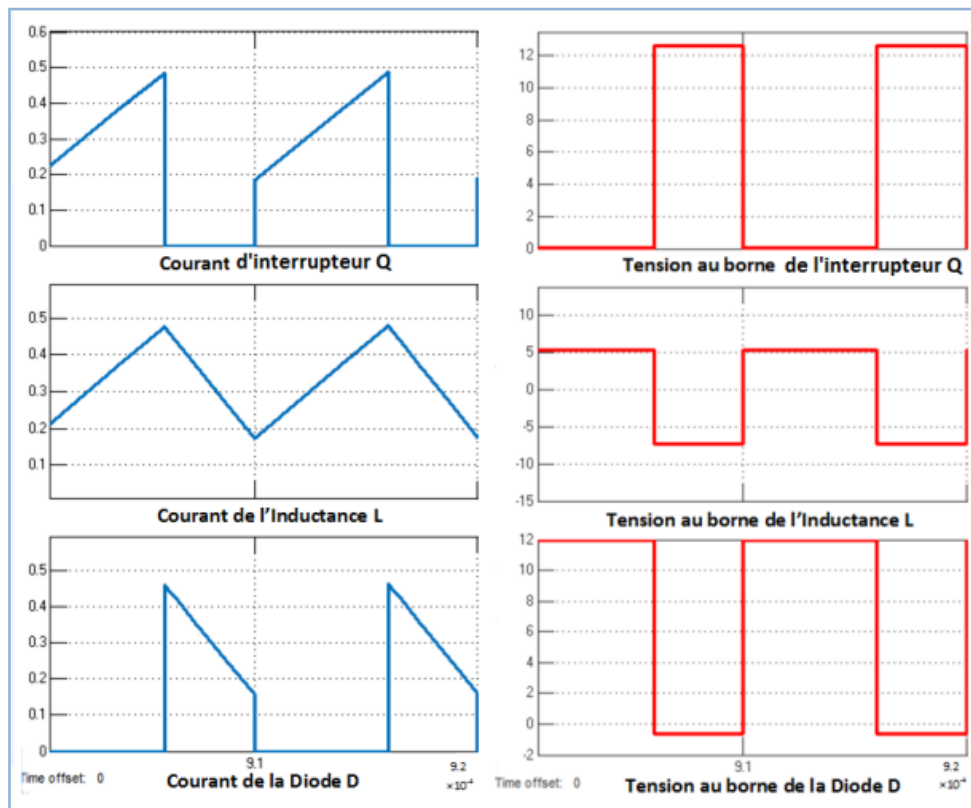
La tension et courant de sortie de Buck en régime établi suivant la valeur de  $T_{On}$  et  $T_{off}$  selon équation (2.16):

$$V_s = \frac{T_{on}}{T} V_e = \alpha V_e \quad (2.16)$$

$$I_s = \frac{1}{\alpha} I_e \quad (2.17)$$

**c) Les caractéristiques de tension et du courant :**

La figure (2.13) , représente les caractéristiques de tension et du courant du convertisseur convertisseur Buck.



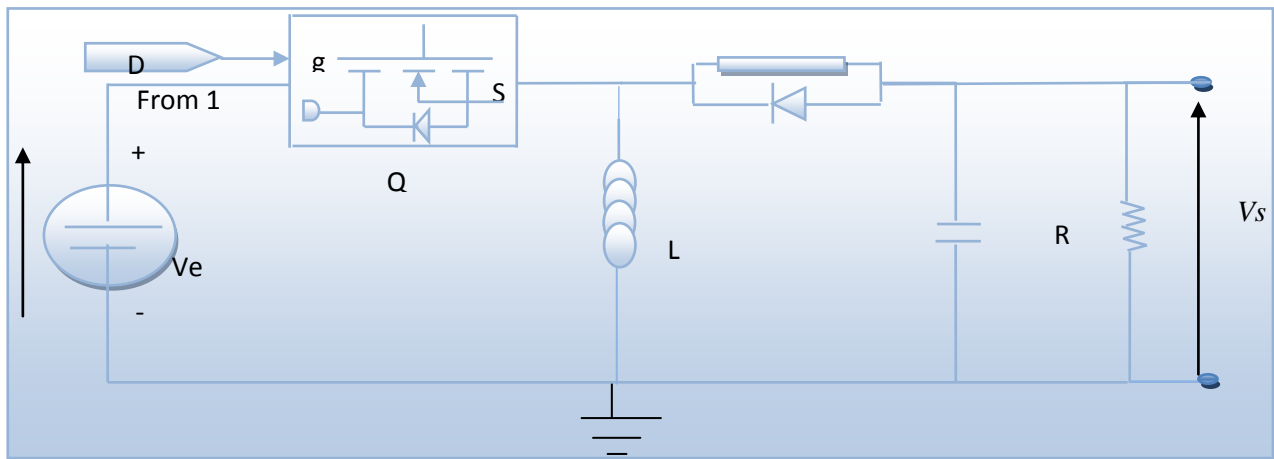
**Figure 2.13 :**Caractéristique de la tension et des courants dans le transistor et l'inductance d'un convertisseur Buck.[26].

### 2.2.4 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.

#### a) Schéma du convertisseur Buck-Boost :

La figure (2.14), représente le Schéma de convertisseur inverseur Buck-Boost



**Figure 2.14 :** Schéma de convertisseur inverseur Buck-Boost

#### b) Principe de fonctionnement :

le fonctionnement du circuit de inverseur Buck-Boost peut se diviser en deux parties selon l'intervalle de commutation ( $T_{On}$ ,  $T_{Off}$ ).

- **Pour  $T_{On}$  (Q fermé) :** l'interrupteur Q est conducteur pendant le temps ( $\alpha T$ ), l'énergie est stockée dans  $L$  et la tension de sortie est négative par rapport au point commun : la diode  $d$  est alors bloquée.



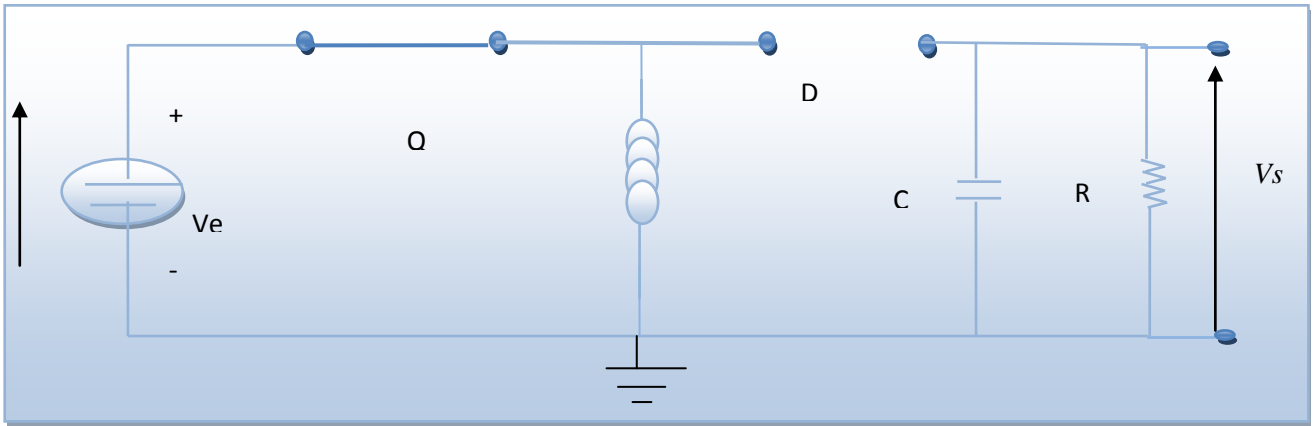


Figure 2.15 : Convertisseur Buck-Boost Durant l'état On.

Pour Q fermé on a les équations des tensions :

$$V_T = 0 \text{ et } V_D = -V_e - V_e \tag{2.18}$$

Alors la tension aux bornes de l'inductance sera :

$$V_L = V_e = L \frac{di}{dt} > 0 \tag{2.19}$$

L'équation du courant :

$$I_L = \frac{V_e}{L} t + I_{min} \tag{2.20}$$

- Pour T<sub>Off</sub> (Q ouvert) : le blocage de l'interrupteur Q provoque la décharge de l'inductance dans la charge R et le condensateur C. (figure (2.16))

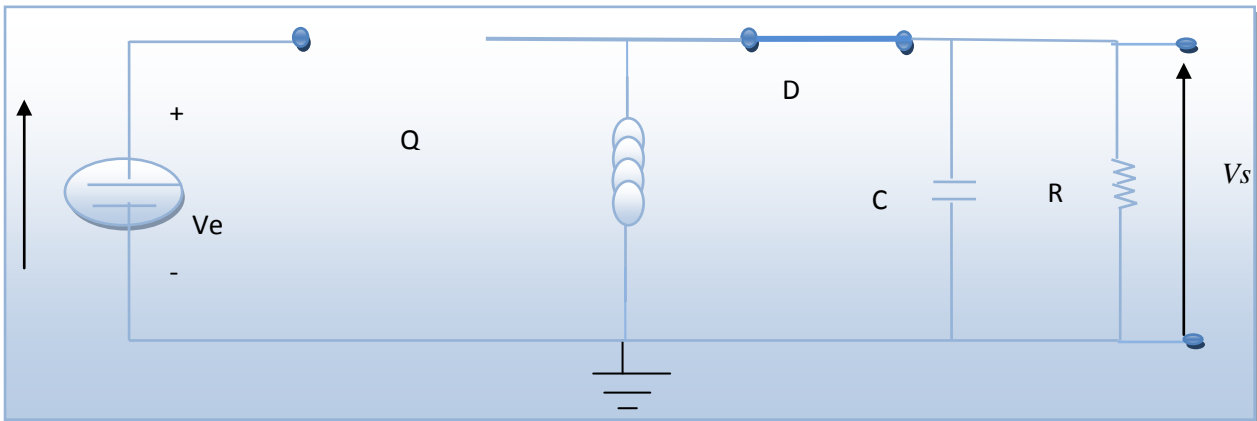


Figure 2.16 : Convertisseur Buck-Boost Durant l'état Off.

L'équation de la tension : Pour Q ouvert, les équations des tensions sont :

$$V_D = 0 \quad \text{Et} \quad V_T = V_e + V_e \quad (2.21)$$

Alors la tension  $V_L$  sera :

$$V_L = -V_s = L \frac{di}{dt} < 0 \quad (2.22)$$

L'équation du courant :

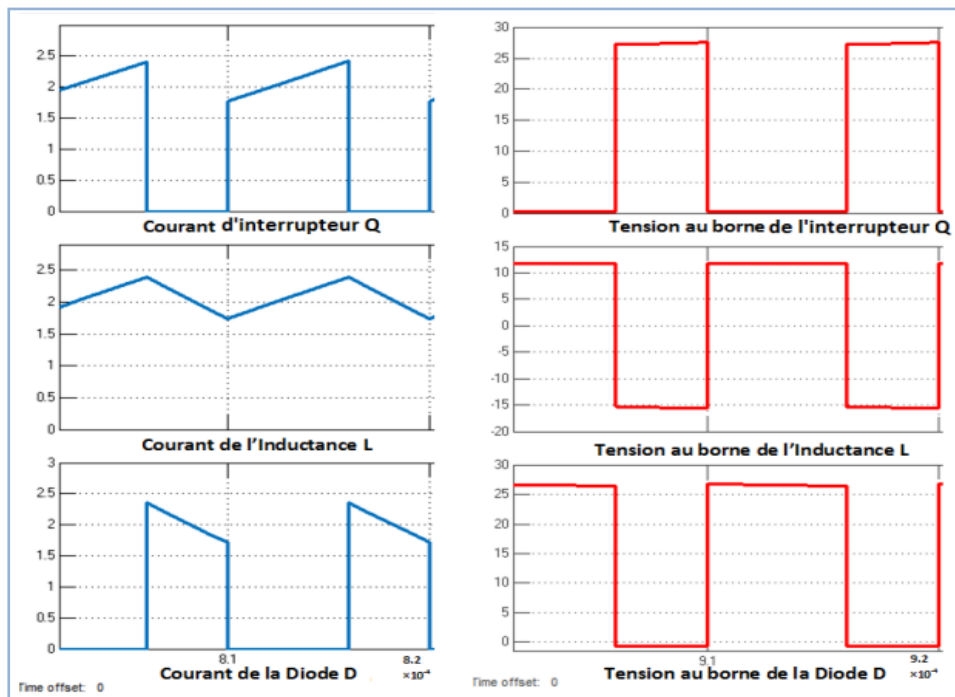
$$I_L = \frac{-V_s}{L} t + I_{max} \quad (2.23)$$

La tension suivant la valeur de  $T_{On}$  et  $T_{off}$  :

$$V_s = \frac{T_{on}}{T_{off}} V_e = \frac{\alpha}{(\alpha-1)} V_e \quad \text{avec} \quad \alpha > 1 \quad (2.24)$$

**c) Les caractéristiques de tension et du courant :**

La figure (2.17) , représente les caractéristiques de tension et du courant du convertisseur convertisseur Buck-Boost.



**Figure 2.17 :**Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Buck-Boost[26].

**2.3 Comparaison entre les différents types de convertisseur DC-DC :**

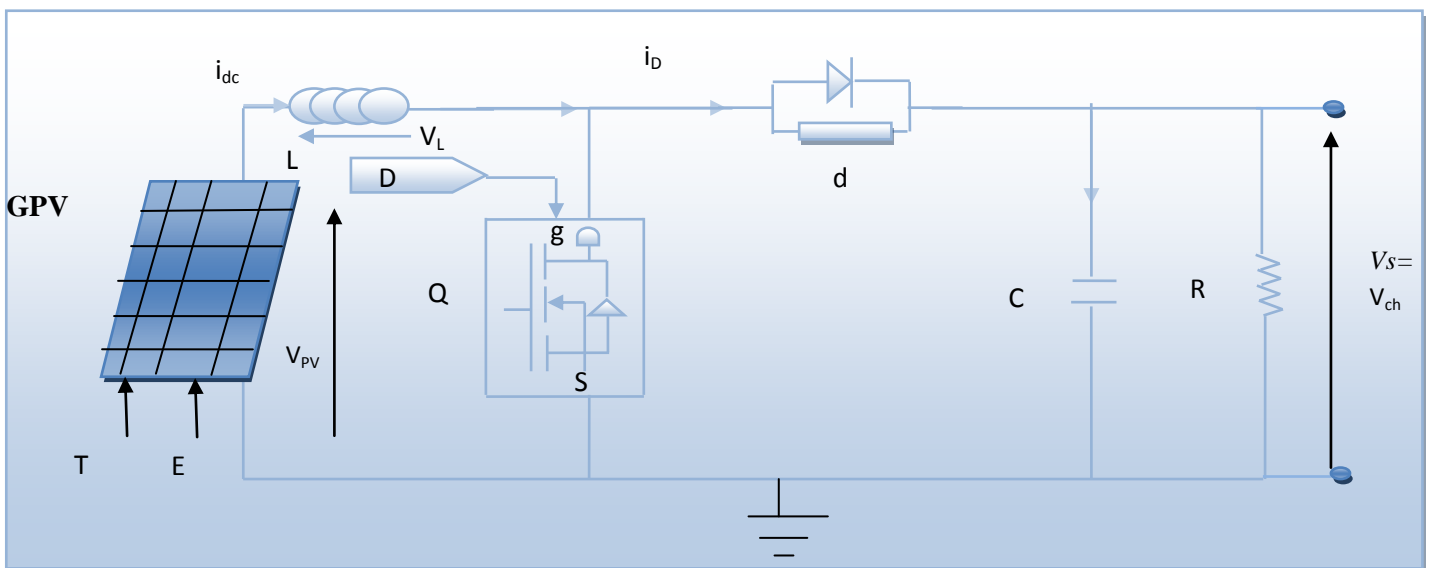
Le tableau 2.1 représente la comparaison entre les types des convertisseurs [32].

**Tableau. 2.1 :** Comparaison les principaux convertisseurs DC-DC

Type d'hacheur	Rapport de transformation	Application
Hacheur (Série)	$\alpha$	Convertie sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure
Hacheur (Parallèle)	$1/(1 - \alpha)$	Convertie une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur
Hacheur (Série-Parallèle)	$(-\alpha)/(1 - \alpha)$	Lorsque la machine fonctionne en moteur lorsqu'elle est alimentée par le hacheur série ou en génératrice La machine fonctionne en génératrice

**2.4 Modélisation d'un système photovoltaïque :**

Dans cette section nous avons représenté le modèle du schéma d'un hacheur parallèle (boost) raccordé au générateur photovoltaïque GPV.(figure(2.18))



**Figure 2.18 :**Schéma d'un hacheur parallèle (boost) raccordé au générateur photovoltaïque.

Le convertisseur statique de puissance de type hacheur parallèle est constitué :

- La source GPV (Générateur Photovoltaïque), qui se comporte en interrupteur commandé à transistor de type (MOSFET OU IGBT) et
- Une diode (D) de manière périodique, avec un angle de commande à compté à partir de 0.
- L'inductance (L) permet de lisser le courant appelé sur la source. Elle stocke de l'énergie électrique puis la restitue pour créer la surtension.
- Le condensateur (C) permet de limiter l'ondulation de tension de sortie.
- Les composants semi-conducteurs utilisés dans le hacheur survolteur seront considérés comme parfaits (chute de tension nulle à l'état passant et courant nul à l'état bloqué).

## 2.5 Les convertisseurs DC/AC (ou Onduleur) :

L'onduleur est un convertisseur statique DC/AC de haute performance. Il convertit la tension continue, en tension alternative contrôlée de façon très précise. La source de tension continue peut être, par exemple un, panneaux solaires [34]. La forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale), c'est que le taux d'harmonique soit très faible, et ,ca dépend essentiellement `a la technique de commande utilisée.

### 2.5.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur :

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie alternative à un autre niveau de tension (ou de courant). Il est dit autonome s'il assure de lui même sa fréquence et sa forme d'onde.

Les types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion :

**a) Onduleur Monophasé :**

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours.

**b) Onduleur triphasée :**

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance. La structure de tel convertisseur se fait par l'association, en parallèle, de trois onduleurs monophasés en demi pont (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphasées de  $120^\circ$  degrés, l'une par rapport à l'autre .

**2.5.2 Choix du convertisseur DC/AC :**

Dans le système d'alimentation photovoltaïque sur le réseau électrique, le courant continu fourni par le panneau solaire devrait être converti en courant alternatif afin de connecter le réseau. Dans cette condition, un onduleur triphasé de tension est exigé.

**2.5.3 Structure d'onduleur :**

Les onduleurs triphasés constitués de trois bras chaque bras se compose de deux interrupteurs. Les interrupteurs choisis, constituent bien une cellule de commutation. Leur fonctionnement doit être complémentaire de ne jamais court-circuiter la source continue.

Donc les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant. et se compose soit d'un thyristor et une diode en antiparallèle ou bien un transistor avec une diode en antiparallèle [35].

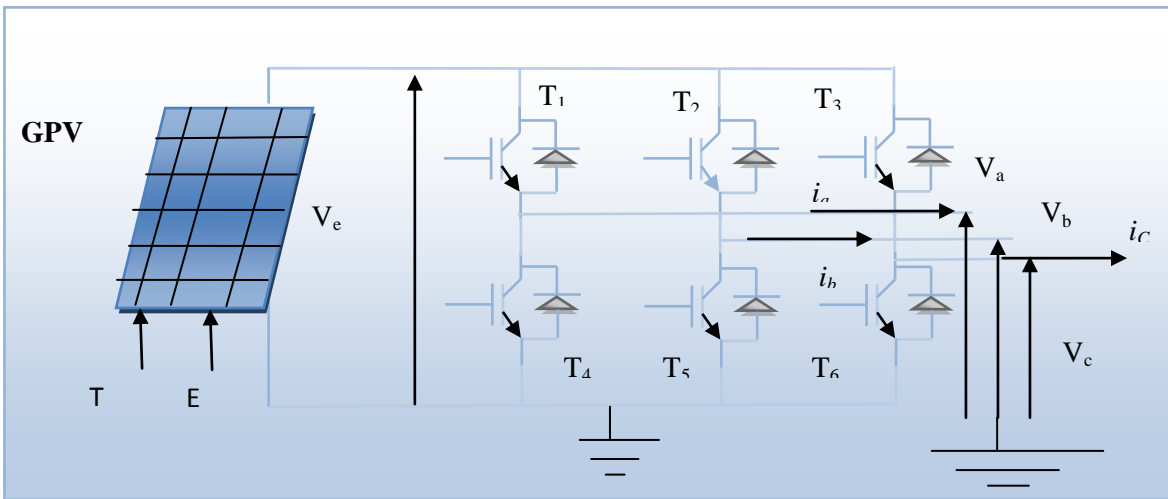


Figure 2.19 : Structure d'un onduleur triphasée (3Φ).

## 2.6 Modulation d'un système photovoltaïque aux réseaux électriques :

### 2.6.1 Structure à convertisseur unique :

Les onduleurs triphasés constitués de trois bras chaque bras se compose de deux interrupteurs. Les interrupteurs choisis, constituent bien une cellule de commutation. Leur fonctionnement doit être complémentaire afin de ne jamais court-circuiter la source continue .

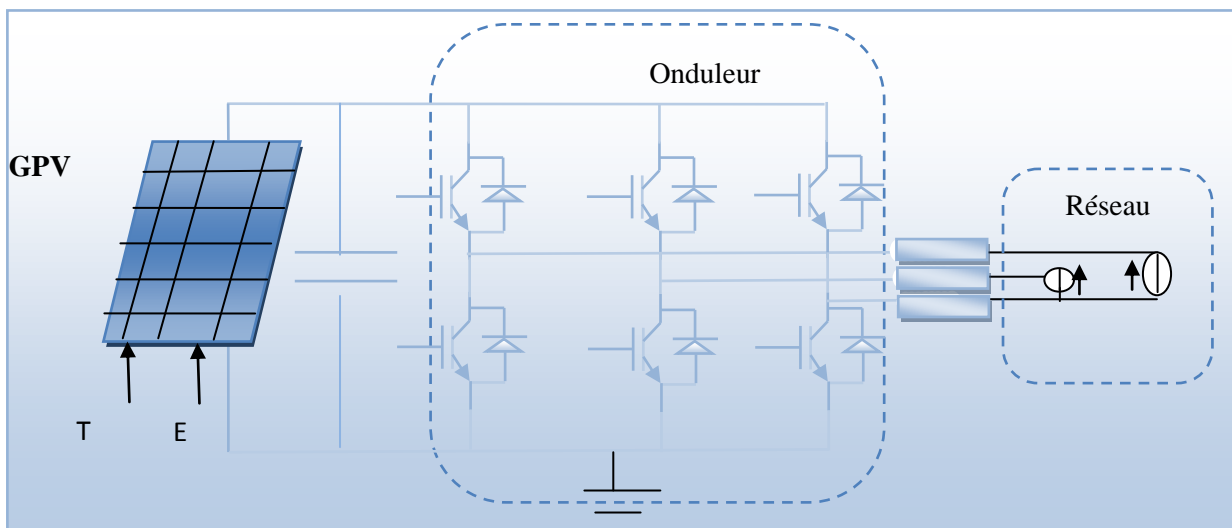


Figure 2.20 :Plusieurs modules PV en série vers un seul onduleur [36].

### 2.6.2 Structure avec bus à basse tension alternative

La figure 2.21 montre un onduleur associé à un circuit de commande qui est directement connecté au module photovoltaïque. La tension en sortie de ce dernier est transformée en une tension alternative de fréquence 50 Hz. Cette tension est transportée grâce à un bus alternatif (220 V – 50 Hz, exemple du schéma) vers un transformateur central qui l'élève au niveau désiré.

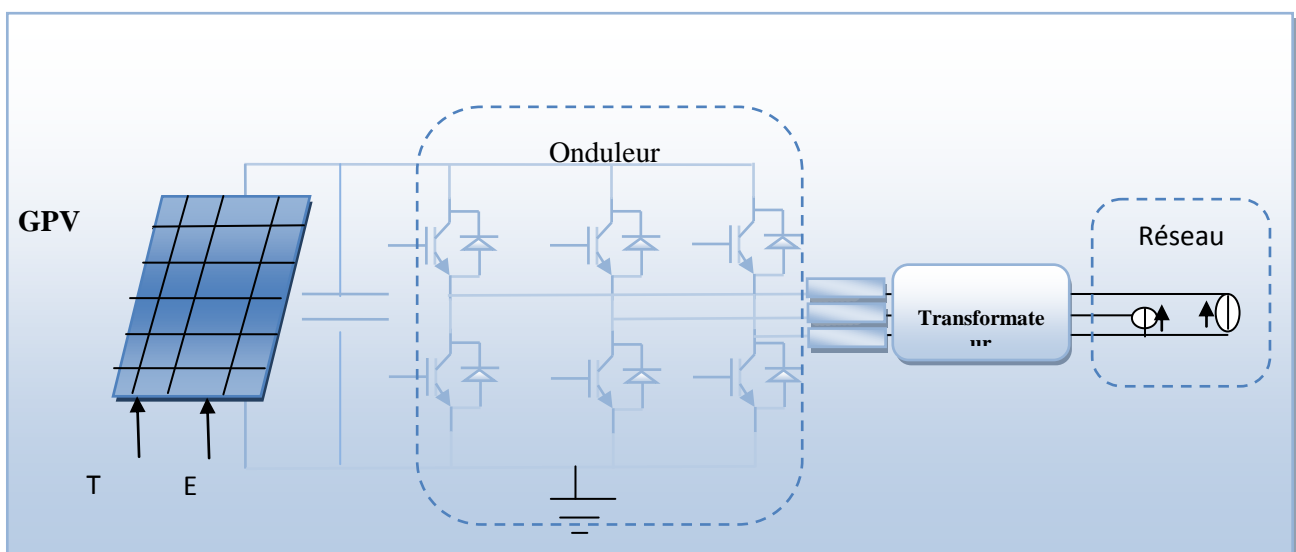


Figure 2.21 : Bus à basse tension alternative [36]

### 2.7 Commande de l'onduleur :

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Deux méthodes de commande peuvent être utilisées [26]:

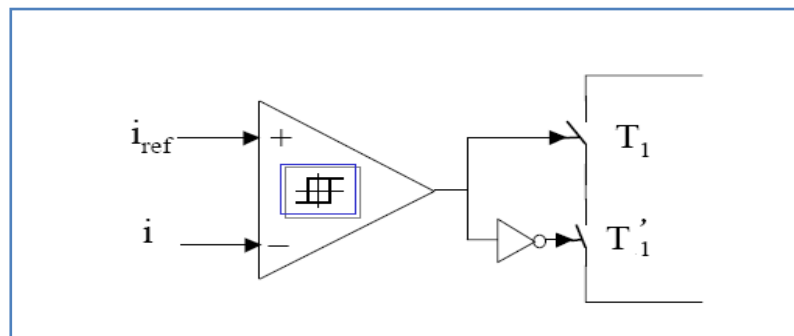
- Commande par hystérésis,
- Commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

### 2.7.1 Commande par hystérésis :

Le principe de contrôle des courants par hystérésis consiste à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de référence.

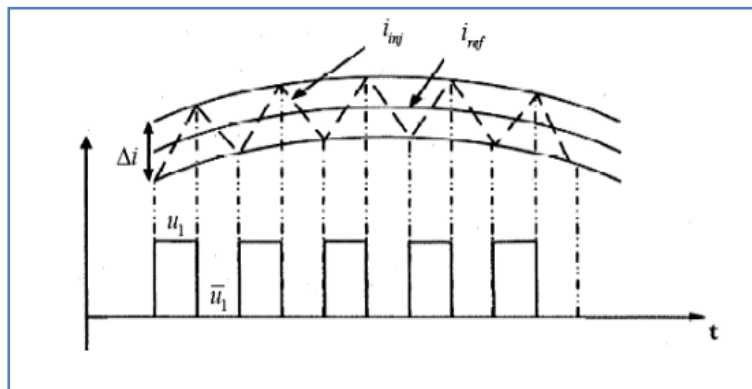
Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation.

En pratique, c'est la technique schématisée sur la figure 2.22, que l'on utilise. La différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit directement l'ordre de commande des interrupteurs du bras correspondant de l'onduleur [37]:



**Figure 2.22:** Contrôle de courant par hystérésis [37].

Le principe de la commande des interrupteurs est illustré par la figure 2.23 :



**Figure 2.23:** Commande des interrupteurs par hystérésis [38].



2.7.2 Commande par MLI :

La méthode MLI met en œuvre d'abord un régulateur qui, à partir de l'écart entre le courant et sa référence, détermine la tension de référence de l'onduleur . Cette dernière est ensuite comparée avec un signal en dent de scie à fréquence élevée (porteuse).

Le schéma de principe de cette méthode est donné sur la figure 2.24 [37] :

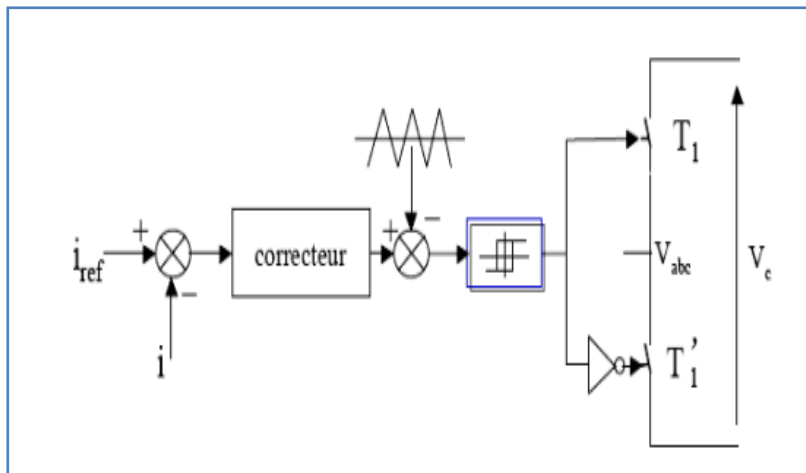


Figure 2.24 : Contrôle de courant par MLI [37].

Le schéma de principe de la commande est donné par la figure 2.25 suivante :

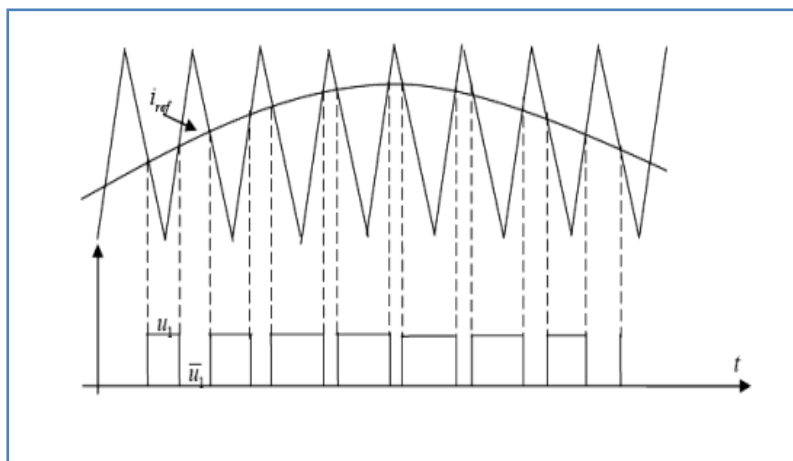


Figure 2.25 : Commande des interrupteurs par MLI [38].

**2.8 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté le système photovoltaïque ainsi une généralité sur les convertisseurs statiques de type DC-DC et DC-AC. Ensuite, nous avons donné les différentes structures de chaque convertisseur Hacheur et l'onduleur.

Dans le chapitre suivant, nous allons présent la commande de MPPT d'un système convertisseur DC-DC de puissance.

## *Chapitre 3 :*

# *Commande de Maximisation de Puissance MPPT*

### 3. Introduction :

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. Le traqueur est conçu généralement avec un convertisseur selon une technique de commande appropriée (hacheur élévateur Boost). Elles sont classées en deux catégories : les méthodes indirectes et les méthodes directes. Ces dernières représentées généralement par la méthode de Perturbation & Observation et la méthode de l'incrémentation de la conductance.

Le but de ce chapitre ,on a opté à la méthode de Perturbation et Observation (P&O), qui est très simple à implanter, et de bon rendement.

#### 3.1 Classification de l'algorithme de suiveur de la puissance max :

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées: méthodes directes et indirectes [34].

##### 3.1.1 Les méthodes indirectes :

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser : 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.

**a) La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur :**

Cette méthode, est basée sur la tension du générateur PV au point de puissance maximale qui est approximativement proportionnelle à sa tension à circuit ouvert  $V_{oc}$ . La constante proportionnelle  $k_1$ , dépend de la technologie de cellules photovoltaïques, du facteur de forme et des conditions météorologiques.

$$K_1 = \frac{V_{Mpp}}{V_{OC}} \cong cte < 1 \quad (3.1)$$

La tension de circuit ouvert du générateur PV est mesurée et stockée en arrêtant le système cette opération s'effectuant à une certaine fréquence. Le MPP est calculé suivant l'équation (3.1). Et la tension de fonctionnement est ajustée sur le point de puissance maximale. Bien que cette méthode soit apparemment simple, il est difficile de choisir une valeur optimale de  $k_1$ .

Cette méthode souffre donc d'inexactitude mais présente l'avantage d'être simple et à bas prix. Aussi, l'interruption de service à la limite des systèmes avec stockage où la déconnexion des panneaux est « transparente » pour l'utilisateur.

**b) La méthode de court-circuit :**

Cette méthode est similaire à la précédente et est basée sur la proportionnalité existant entre le courant de court-circuit et le courant au point de puissance maximale :

$$K_2 = \frac{V_{Mpp}}{I_{OC}} \cong cte < 1 \quad (3.2)$$

Cette méthode présente les mêmes avantages et inconvénients que ceux de la méthode de la tension de circuit ouvert.

### 3.1.2 Les méthodes directes :

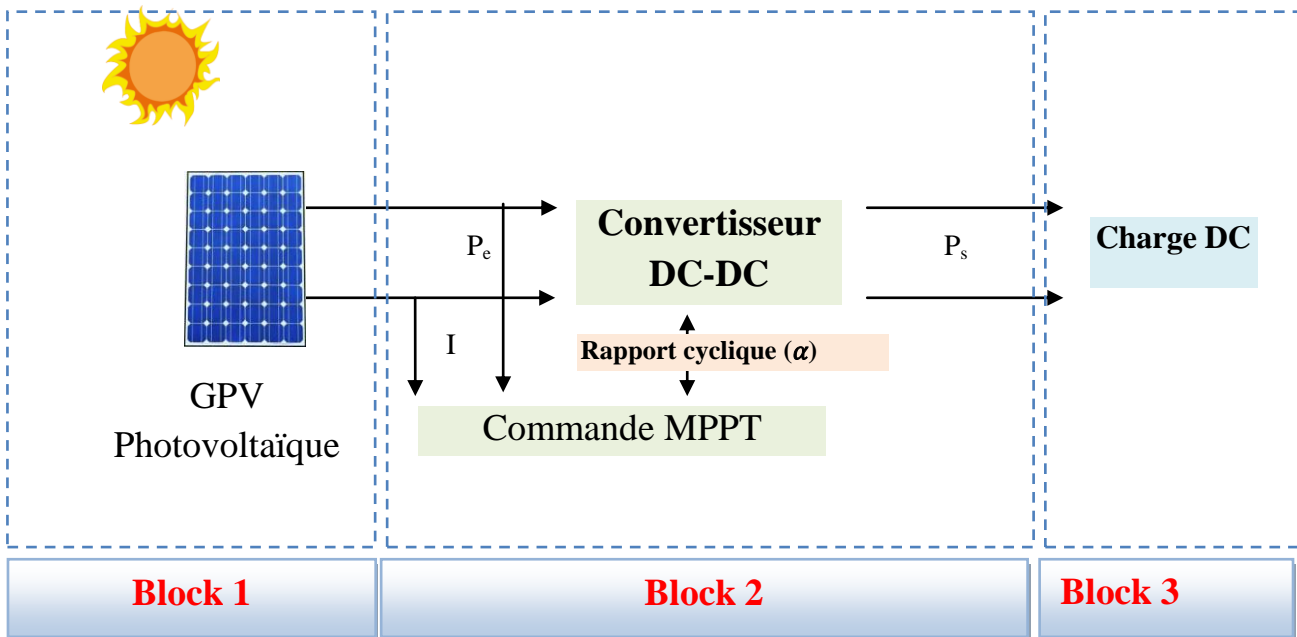
Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures.

L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance ....

### 3.2 Commande de maximisation de puissance d'un convertisseur DC/DC

Une commande de maximisation de puissance, ou bien « Recherche du Point de Puissance Maximum » en anglo-saxon « Maximum Power Point Tracking (MPPT) » est un dispositif de poursuite qui détermine le point de fonctionnement idéal, ou point de puissance maximale, des modules photovoltaïques (panneaux solaires photovoltaïques) . Ainsi, les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par un MPPT. Le MPPT pilote le convertisseur électrique auquel il est associé. Ainsi, le MPPT asservit le convertisseur de tension DC-DC qui transmet à la charge (généralement une batterie ou onduleur) la puissance optimale du module photovoltaïque.

La figure 3.1 représente une chaîne de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT.



**Figure 3.1 :** Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

Cette figure est associée chaîne des blocks suivant :

- **Block 1 :** Générateur photovoltaïque GPV.
- **Block 2 :** Le convertisseur statique de puissance type DC-DC permettant de faire une adaptation entre le GPV et la charge de telle sorte que la puissance générée correspond à sa valeur maximale et qu'elle soit transférée directement à la Block 3.
- **Block 3 :** La charge DC.

### 3.2.1 Le principe de la commande MPPT :

Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique ( $\alpha$  ou  $D$ ) en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (DC), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le générateur photovoltaïque peut fournir.

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP.

Pour savoir l'efficacité de la technique du MPPT, on définit le rendement MPPT ( $\eta_{\text{MPPT}}$ ) est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{\text{in}}$  [35].

$$\eta_{\text{MPPT}} = \frac{P_{\text{Max}}}{P_{\text{in}}} \quad (3.3)$$

Le recentrage de  $\eta_{\text{MPPT}}$  ( $\eta_{\text{MPPT}} \%$ ) de pertes de puissance d'un module PV ( $P_{\text{in}}$ ), qui correspond à l'entrée de l'étage d'adaptation, par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire ( $P_{\text{Max}}$ ).

### 3.2.2 Les Algorithmes MPPT :

Les algorithmes MPPT sont nécessaires dans les applications photovoltaïques car le MPP d'un panneau solaire varie en fonction de l'irradiation et de la température, de sorte que l'utilisation d'algorithmes MPPT est requise afin d'obtenir la puissance maximale d'un panneau solaire.

Tableau 3.1 représente les classifications des différentes méthodes de poursuite du PPM.



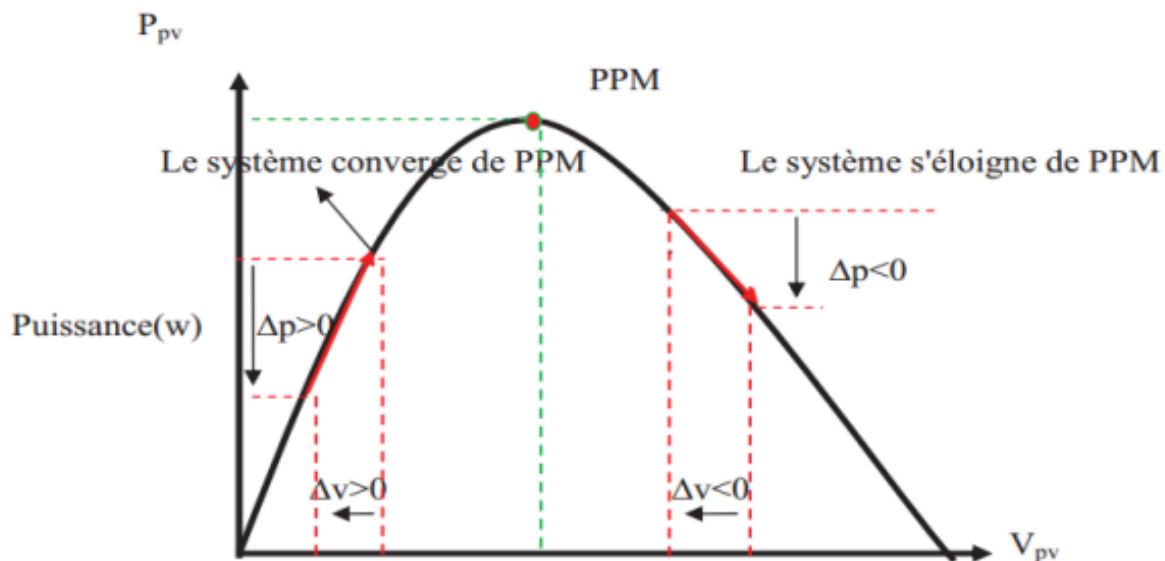
**Tableaux 3.1 :** Classification des différentes méthodes de poursuite du PPM.

Commande direct	Commande indirect
MPPT basé sur l'équilibre de Puissance	MPPT basé sur les calculs Numériques
MPPT Perturber et Observer (PO)	MPPT basé sur le courant de court-circuit
MPPT Incrémental et inductance (PO)	MPPT basé sur la tension en court-ouvert

### 3.2.2.1 Commande de Perturbe & Observe (P&O)

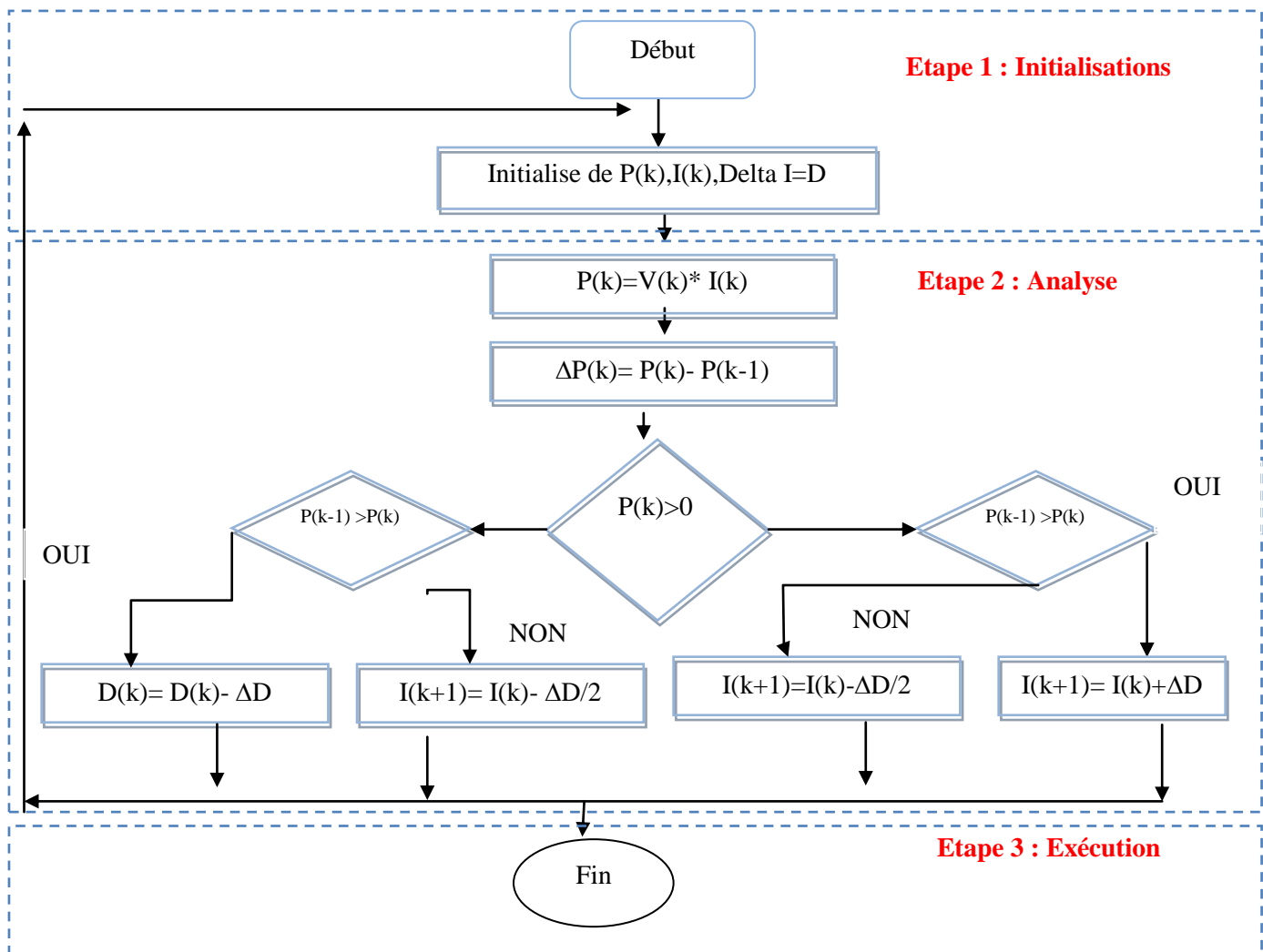
Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{PV}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{PV}$  qui en résulte

La figure 3.2 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.[40].

**Figure 3 .2 :** Schéma de converge vers le PPM par P&O.

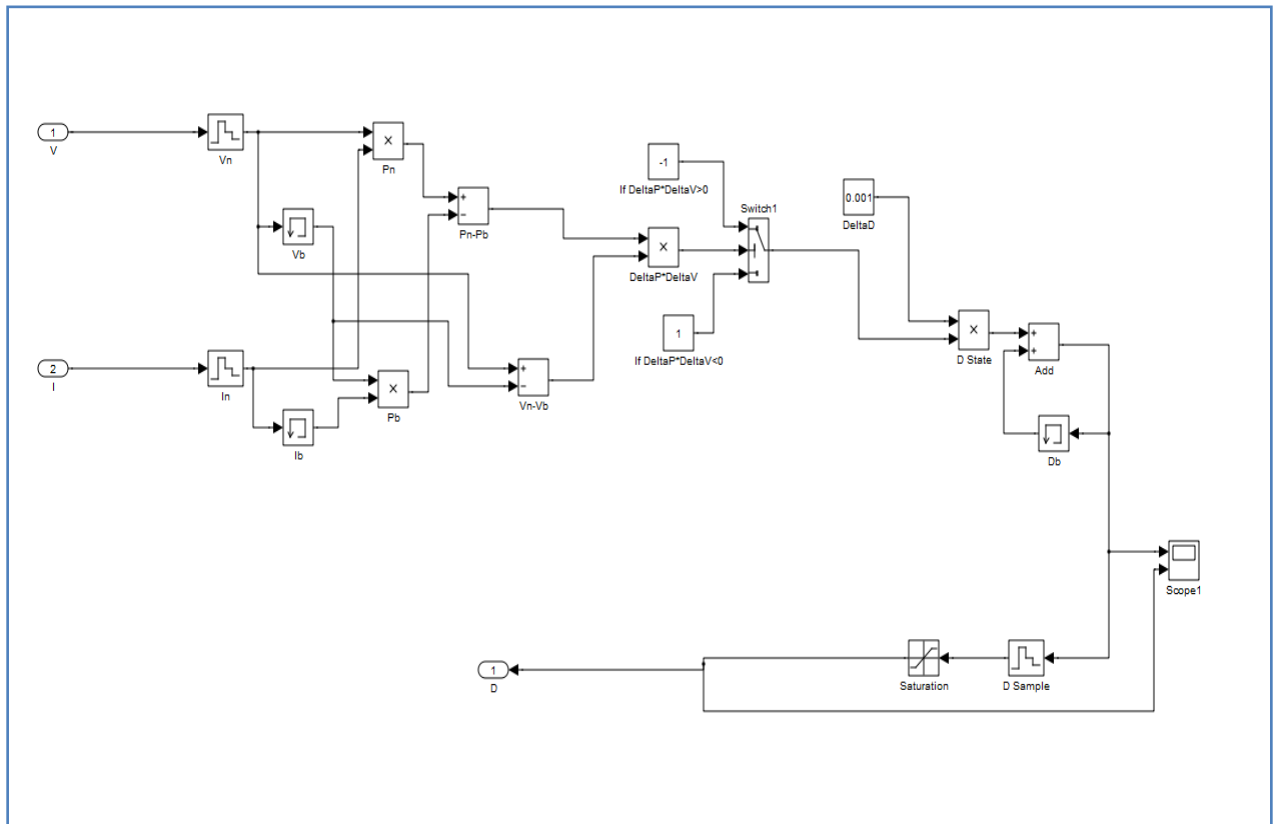
L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P&O) consiste des étapes suivant (figure 3.3) :

- **Etape 1** : Initialisations.
- **Etape 2** : Analyse .
- **Etape 3** : Exécution.



**Figure 3 .3** : Organigramme de l'algorithme perturbation et observation.

D'après l'organigramme de la Figure précédente, on a réalisé le schéma block suivant :



**Figure 3.4 :** Programme et schéma block de la technique PO sous MATLAB /SIMULINK.

### 3.2.2.2 Commande d'incrément de la conductance (ou IncCond) :

Cette méthode s'intéresse directement aux variations de la puissance en fonction de la tension. La conductance est une grandeur physique relativement connue il s'agit du quotient de tension du GPV comme indiqué ci-dessous:

$$G = \frac{I_{Pv}}{V_{Pv}} \tag{3.4}$$

La variation élémentaire (incrément) de la conductance peut être définie par

$$dG = \frac{dI_{Pv}}{dV_{Pv}} \tag{3.5}$$

La puissance produite par le générateur PV peut être exprimé par :

$$P_{pv} = I_{pv} * V_{pv} \quad (3.6)$$

D'où en écrivant la dérivée :

$$\frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} = \frac{\partial (I_{pv} V_{pv})}{\partial V_{pv}} = I_{pv} \frac{\partial V_{pv}}{\partial V_{pv}} + V_{pv} \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} \quad (3.7)$$

D'où

$$\frac{1}{V_{pv}} \cdot \frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} = \frac{\partial (I_{pv} V_{pv})}{\partial V_{pv}} = G + dG \quad (3.8)$$

Le point de fonctionnement se trouve à droite de PPM

Ces équations peuvent être écrites comme :

$$\frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} = - \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (3.9)$$

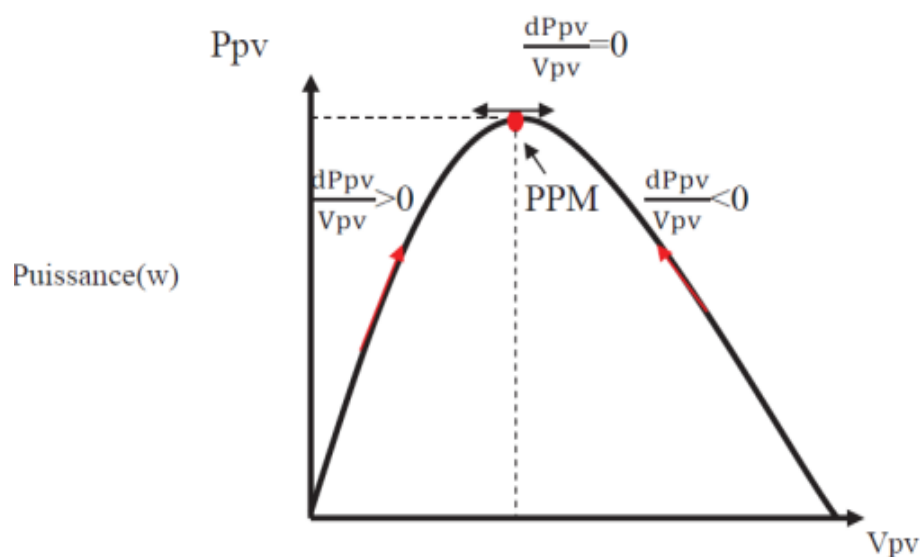
Le point de fonctionnement se trouve à au PPM

$$\frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} > - \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (3.10)$$

Le point de fonctionnement se trouve à gauche de PPM

$$\frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} < - \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (3.11)$$

Le point de fonctionnement se trouve à droite de PPM



**Figure 3.5 :** Trajectoire par incrémentation de conductance [40]

L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'incrémentale de la conductance consiste des étapes suivant (figure 3.5) :

- **Etape 1** : Initialisations.
- **Etape 2** : Analyse .
- **Etape 3** : Exécution.

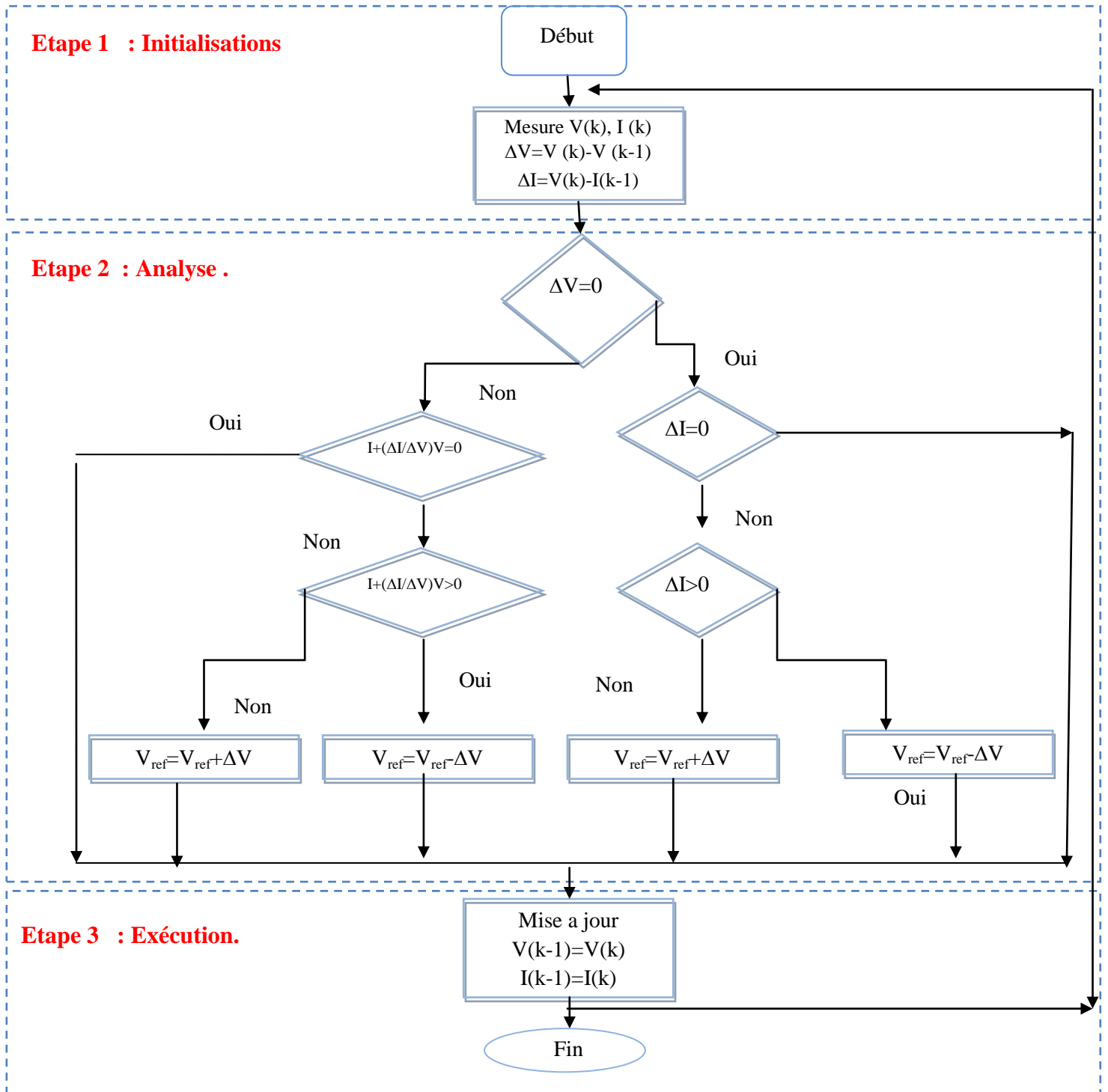
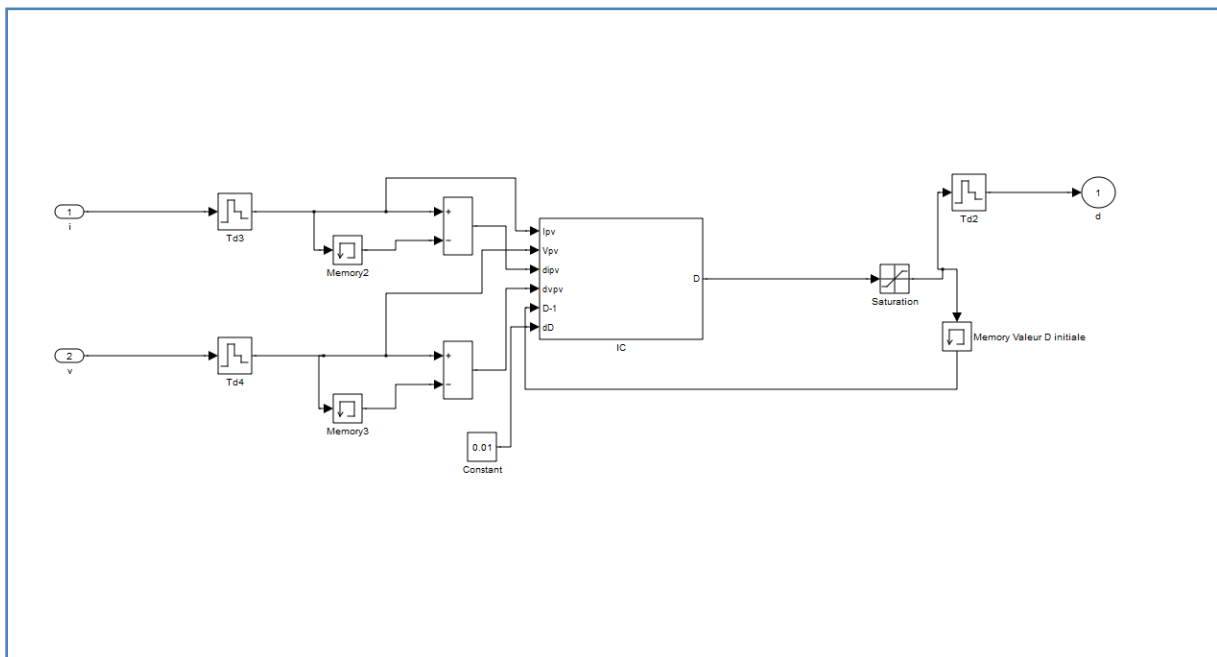


Figure 3.6 : Organigramme de l'algorithme de l'incrémentale de la conductance

Cet algorithme présente des difficultés de mise en œuvre due à la complexité du circuit de commande et le calcul en temps réel de la dérivée nécessite un processeur de calcul rapide. Autrement dit, l'exécution de la commande IncCond nécessite plus de temps par rapport P&O. Pratiquement, même IncCond présente des oscillations autour du PPM. Une comparaison sur le rendement MPPT entre les deux techniques les plus utilisées P&O et IncCond est faite par la référence. Le résultat trouvé est de 89,9% pour IncCond contre 81,5% pour P&O [25].

D'après l'organigramme de la figure (3.6), on a réalisé le schéma block suivant :



**Figure 3.7:** Programme et schéma bloc de la technique INC sous MATLAB /SIMULINK.

### 3.2.3 Les avantages et les inconvénients :

#### 1- Avantage :

- Parlant de la méthode PO, parmi les avantages que l'on peut citer c'est la structure de régulation simple ainsi que le nombre des paramètres mesures réduit.

- Pour la méthode INC l'avantage principal de cet algorithme est qu'il offre un bon rendement même sous un changement rapide des conditions atmosphériques. En revanche, les rendements de MPPT de la conductance par incrémentation et de l'algorithme PO sont essentiellement identiques.
- Identification des paramètres du panneau PV pour les deux méthodes non nécessaire et la vitesse de convergence. Moyenne. [41].

## 2- Inconvénients :

- Pour la méthode PO il existe un dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques.
- Le circuit de commande d'INC est complexe et très coûteux.

Après cette étude, on peut dire que l'avantage d'utiliser la méthode P&O est sa simplicité et la facilité d'implémenter son algorithme.

### **3.3 Conclusion :**

Dans ce chapitre on a fait l'étude des algorithmes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme la technique de commande perturbe& observe (P&O). Cette technique de commande MPPT utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Dans le chapitre suivant, nous allons aborder en détail la commande vectorielle de ce système et son rôle dans l'amélioration des performances du système du pompage photovoltaïque.



## *Chapitre 4 :*

*Simulation et leur Performance de Convertisseur  
de Puissance au PV Connecté Au réseau*

#### 4. Introduction :

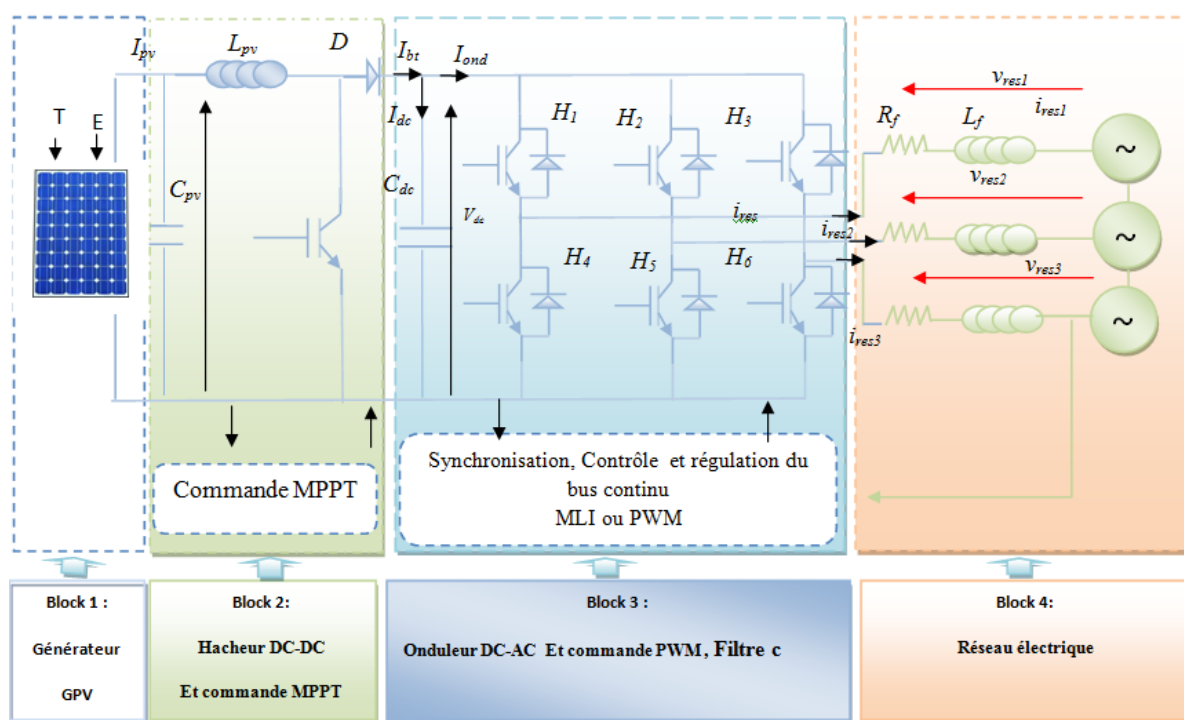
Dans ce chapitre nous allons effectuer la simulation chaîne d'un système générateur photovoltaïque. La chaîne d'un système proposée contient une représentation détaillée des composants d'électronique de puissance d'un système photovoltaïque accordé aux réseaux, le générateur photovoltaïque, le convertisseur de puissance (DC-DC) commandé par MPPT, l'onduleur de tension (DC-AC) triphasé, en suite ce dernier commandé par MLI (sinus triangle), un filtre (LC-L), une charge du côté (AC), et le réseau électrique BT. Pour améliorer l'efficacité de conversion d'énergie PV, il est nécessaire de poursuivre le point de puissance maximale (MPP) de la source d'entrée, c'est pour ce la on utilise un système de commande MPPT par une méthode classique P&O. Ainsi l'onduleur transfère l'énergie produite des modules (PV) dans le réseau en gardant la tension alternative constante.

L'objectif de ce travail, la performance d'une implémentation d'électronique de puissance dont la chaîne de système photovoltaïque connecte au réseau, nous avons utilisé simulation sous l'environnement MATLAB /SIMULINK est d'aider à comprendre les critères de conception d'une chaîne de système photovoltaïque et caractéristique par convertisseur de puissance connectés au réseau électrique. Ces critères permettent de déduire l'énergie électrique injectée au réseau électrique.

### 4.1 Description du système étudié

#### 4.1.1 Présentation de la structure du système photovoltaïque au réseau électrique proposé

La figure 4.1 représente la configuration du principe de fonctionnement système photovoltaïque raccordé au réseau électrique de distribution. Le générateur photovoltaïque est relié a un convertisseur DC/DC qui assure le suivi du point de fonctionnement optimal (PPM). L'ensemble est connecte au réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/AC commandé par une stratégie qui permet de synchroniser la source photovoltaïque avec le réseau électrique.



**Figure 4.1 :** Modélisation d'un système photovoltaïque-réseaux électrique

(a) Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

(b) Technique du système PV raccordé au réseau

Avec

- ✓ C : valeur de la capacité
- ✓  $V_{dc}$  : tension du bus continu
- ✓  $I_c$  : courant traversant le condensateur
- ✓  $I_{res}$  : courant ondulé par le convertisseur DC-AC du côté réseau
- ✓  $I_{bt}$  : courant de sorti du hacheur
- ✓  $I_{ond}$  : courant d'entrée de l'onduleur

- ✓  $R_f$ ,  $L_f$  : résistance et inductance du filtre
- ✓  $V_{in}$  :  $i= A, B$  et  $C$  tensions simples du réseau
- ✓  $I_{ti}$  :  $i= A, B$  et  $C$  courants à travers le filtre

Le système choisi est représenté sur la figure (4.1), il est composé de :

### 1- Block 1 : Générateur PV

Le système PV représenté par un panneau est un générateur photovoltaïque. Il est constitué de cellules montées en série et parallèle. Les paramètres  $I_{pv}$  et  $V_{pv}$  sont respectivement le courant et la tension du GPV. Pour que ce système fonctionne et utilise qualitativement, Il est relié à un convertisseur de tension DC-DC connu sous le nom de Hacheur Élévateur.

### 2- Block 2 : Convertisseur survolteur (BOOST) avec commande MPPT

Il permet d'Élever la tension du GPV. L'hacheur Boost est constitué d'un interrupteur commandé à la fermeture et l'ouverture, d'une inductance  $L_{pv}$ , d'un diode  $D$  et de deux condensateurs à l'entre  $C_{pv}$  et à la sortie  $C_{dc}$ . Le condensateur  $C_{pv}$  transforme la source de courant GPV en source de tension tandis que  $C_{dc}$  est le bus continu du système. L'interrupteur est commandé par un algorithme MPPT qui permet au système de fonctionner à sa puissance maximale.

### 3- Block 3 : Convertisseur DC-AC (onduleur) connecté avec filtre c

Dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau de distribution, un onduleur est nécessairement utilisé. Où, la connexion de cet onduleur au réseau s'effectue à travers un filtre RL et réseaux électrique [42-43]. L'onduleur transforme la tension continue du bus à une tension alternative. Il est constitué de trois (3) branches dont chacun possède deux interrupteurs complémentaires. Ces interrupteurs sont commandés à l'aide d'une MLI modélisé à partir de la tension du bus  $V_{res}$ , et le courant  $I_{res}$ .

### 4- Block 4 : Le réseau électrique

Les courants qui transitent entre le convertisseur DC-AC et le réseau sont imposés par les bobines constituant le filtre  $R, L$ .

Le Block 4 il représente le réseau électrique connecté avec filtre LC de distribution publique.

**Exemple :** Le réseau électrique BT On suppose que le réseau électrique de distribution publique est de puissance innée ce que conduit une amplitude et fréquence constantes de valeurs  $V = 400 / 230$  V et  $f = 50$  Hz.

4.1.2 Hacheur survolteur commandé par l’algorithme MPPT P&O:

4.1.2.1 Simulation d'un système photovoltaïque

Pour réaliser schéma de block d’une système Hacheur survolteur commandé par l’algorithme MPPT P&O cette simulation, nous avons utilisé le logiciel MATLAB comme outil de tests et de simulation.

Schéma bloc d’une simulation de hacheur survolteur :

La figure (4.2) représente le schéma block d’un circuit convertisseur survolteur qui été simulé à l’état de paramètre suivant le tableau suivant (4.1)

Tableau (4.1) Exemple des paramètres de la simulation de hacheur survolteur.

E	R	L	Ce
30V	22Ω	1.8 mH	2.2 mF

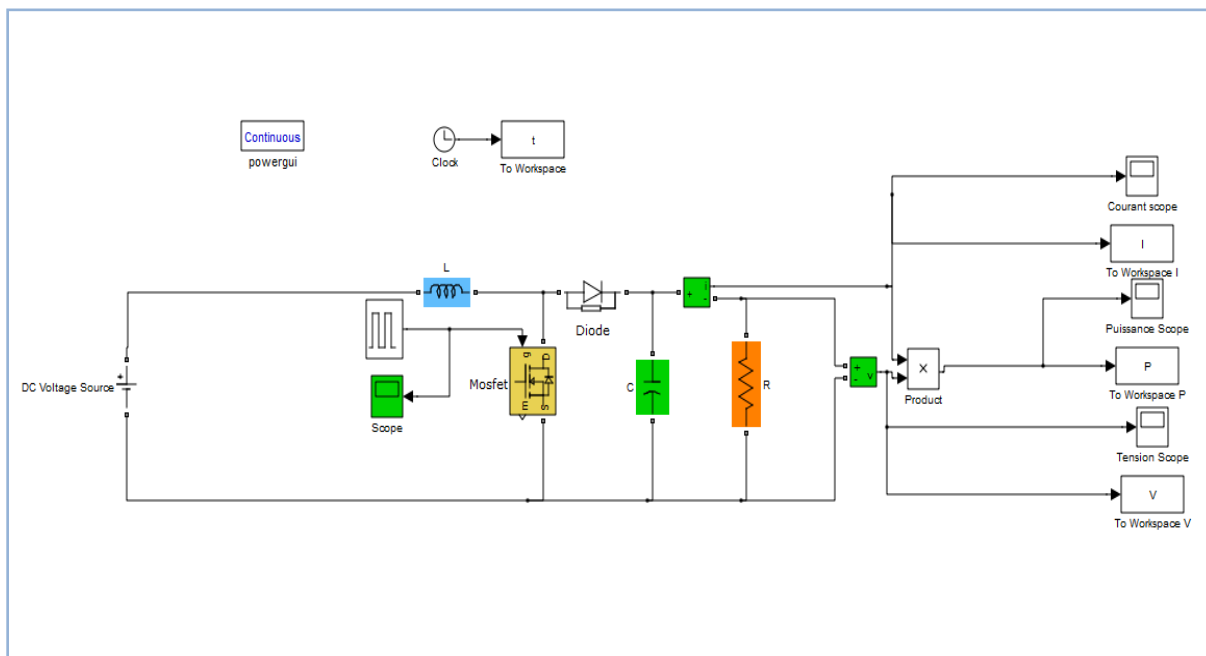
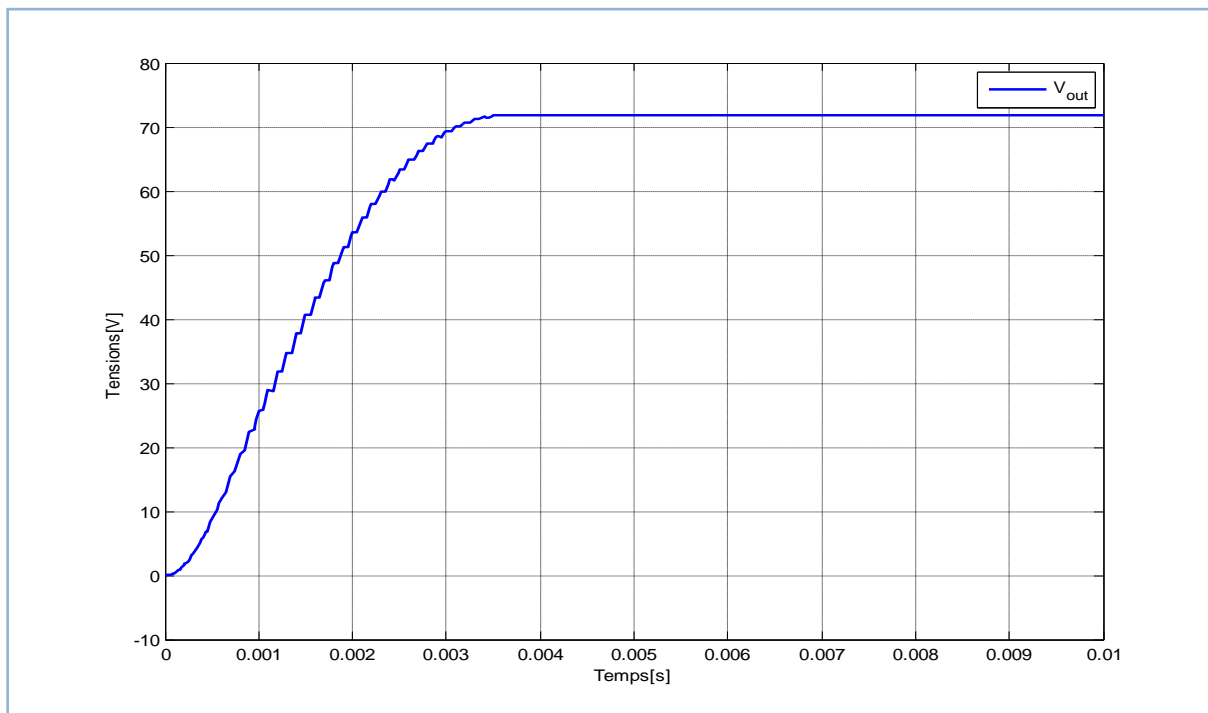


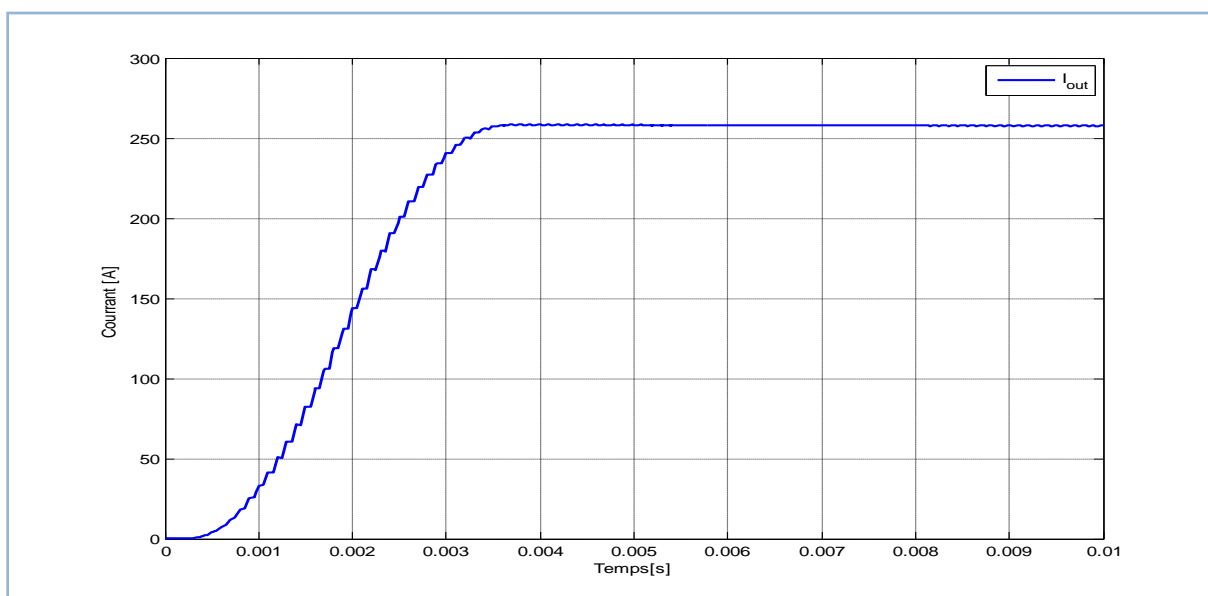
Figure 4.2: Schéma block d’un convertisseur survolteur sous Matlab/Simulink.

**Résultats de la simulation :**

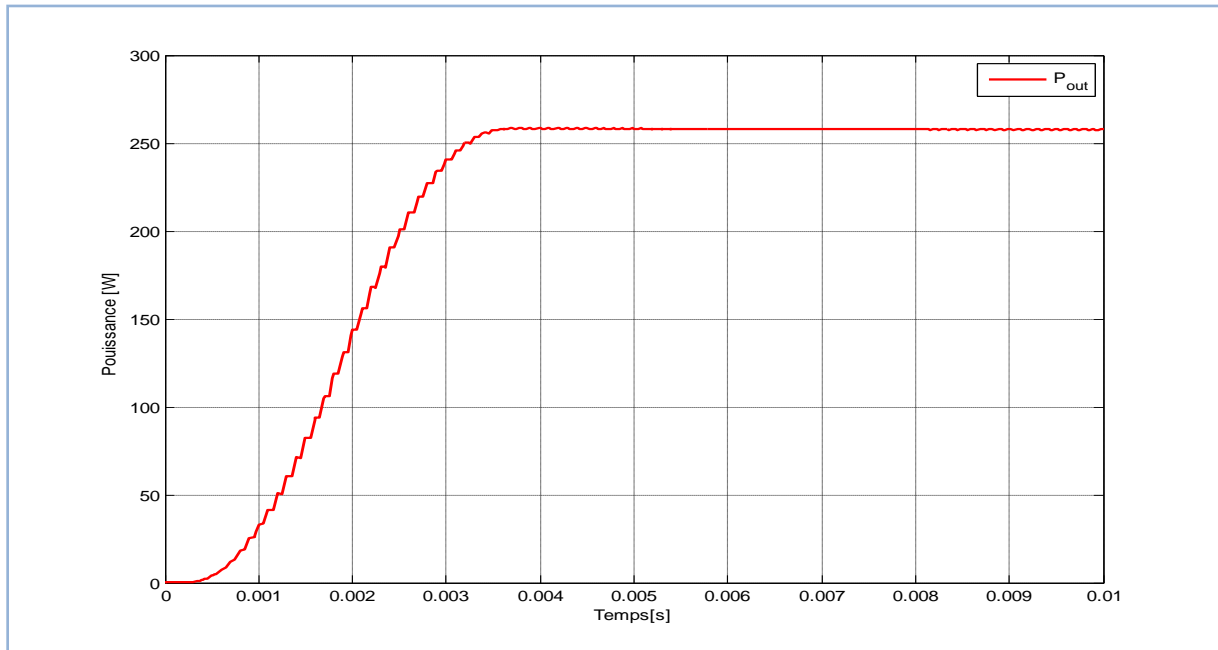
Des résultats des courbes pour différents grandeurs sont illustrés sur les figures



**Figure 4.3 :** Résultats de simulation de la valeur de la tension de sortie du hacheur survolteur.



**Figure 4.4:** Résultats de simulation de la valeur du courant de sortie du hacheur survolteur.



**Figure 4.5 :** Résultats de simulation de la valeur de la puissance de sortie du hacheur survolteur

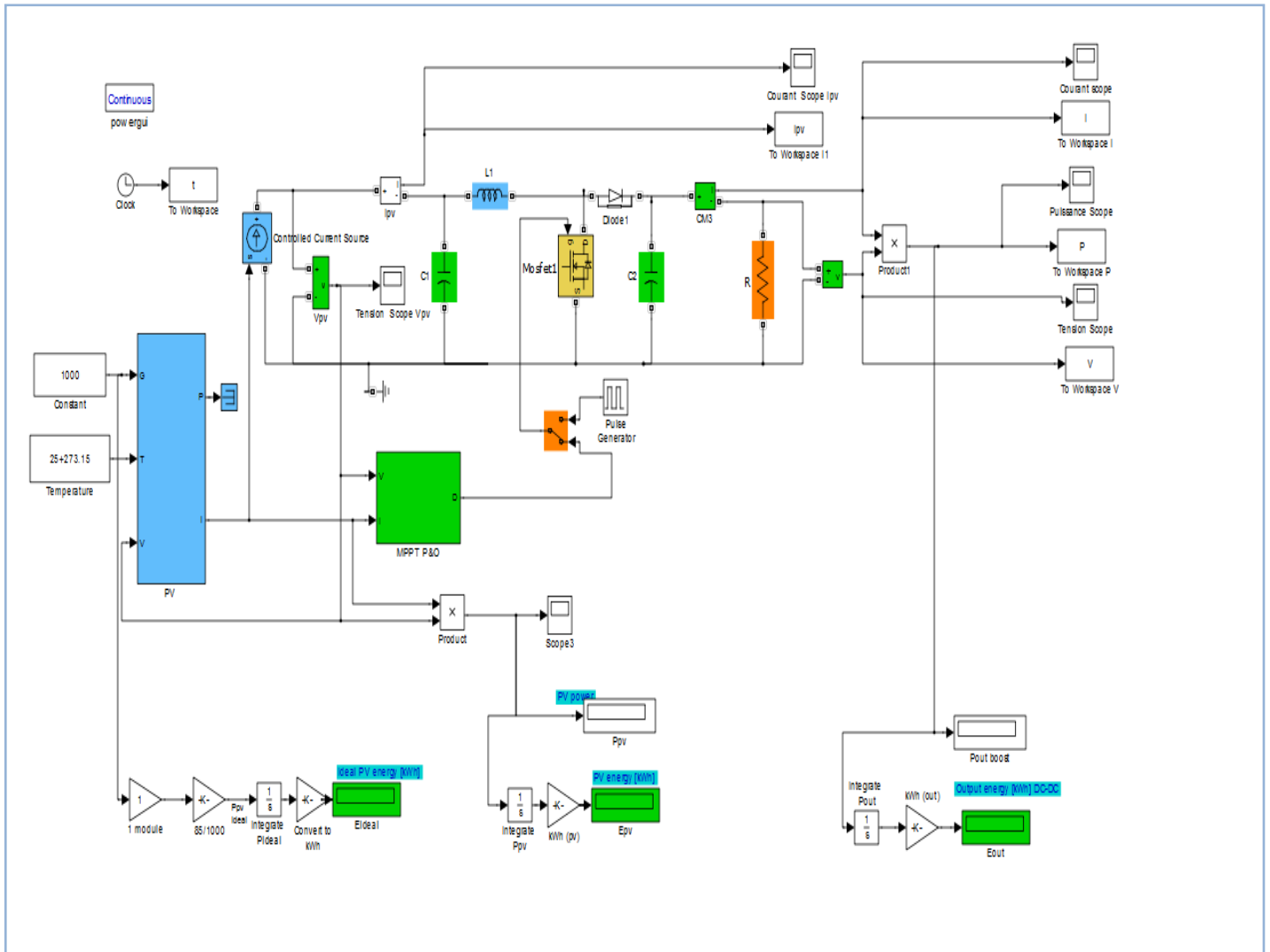
#### 4.1.2.2 Simulation d'un système de convertisseur avec MPPT

Dans cette section, on :

- Analyse la conception et la simulation d'une commande MPPT numérique sont « perturbation-observation qu'on applique aux convertisseurs DC-DC survolteur.
- On effectue la simulation du système dans les conditions standards ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}+273.15$ . ) pour extraire la puissance optimale de l'installation photovoltaïque. Donc la tension du générateur PV après l'utilisation de la technique de recherche de l'MPPT représente la tension optimale.
- Pour montrer bien l'efficacité de la commande MPPT sur la puissance maximale, nous avons simulé le système avec conditions standards fixe ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}+273.15$ ) , et cette simulation est appliquée en deux systèmes sans et avec MPPT les résultats obtenus sont les suivantes :

**A) Simulation avec de la méthode MPPT« P&O » :**  
**A.1 ) Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge)**

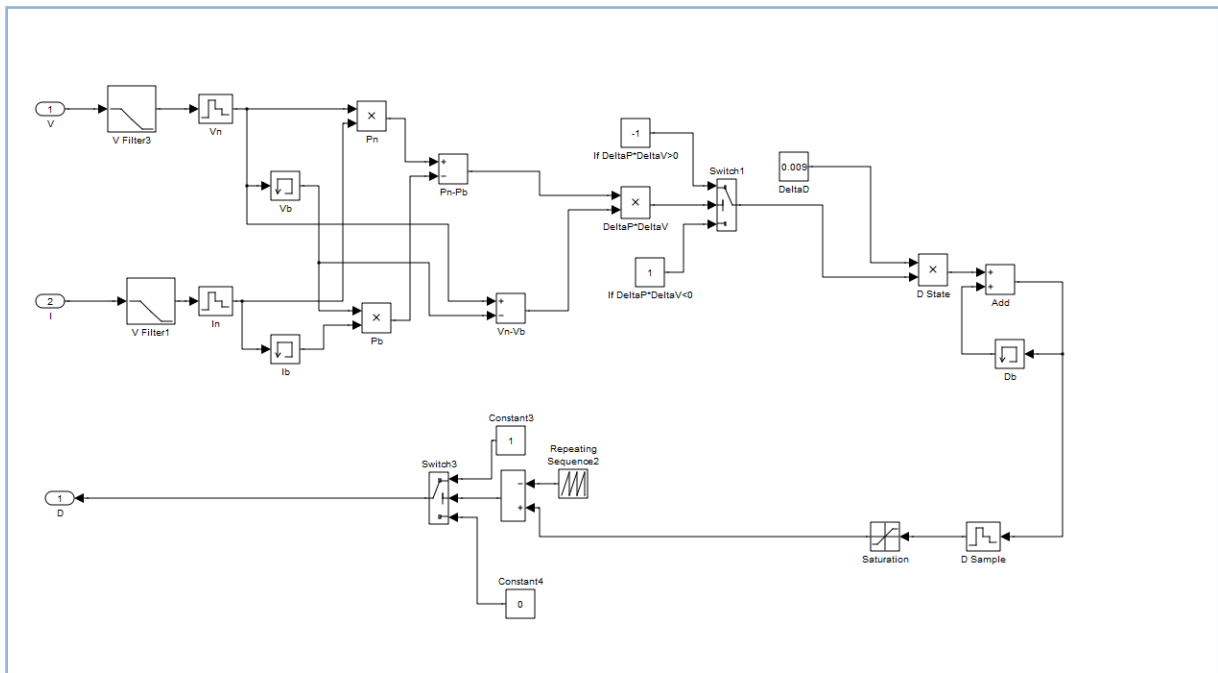
**Schéma bloc :** La figure (4.6) illustre le Schéma bloc de la simulation d'un système PV avec la commande MPPT« P&O »



**Figure 4.6:** Schéma bloc de la simulation d'un système PV avec la commande MPPT sous Matlab/Simulink .

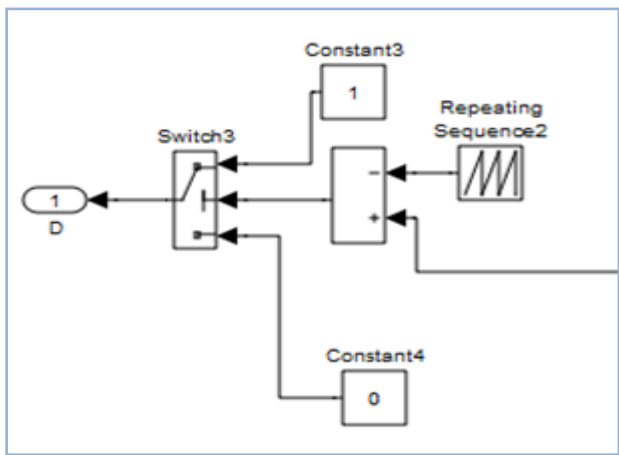


La figure (4.7) illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande de poursuite MPPT avec commande MLI :



**Figure 4.7 :** Schéma block de la commande MPPT « perturbation-observation » sous Matlab/Simulink.

La figure 4.8, représente schéma du bloc de la commande MLI sous Matlab/Simulink.



**Figure 4.8:** Schéma bloc de la commande MLI sous Matlab/Simulink.

## A.2 ) Résultats de la simulation

Le tableau 4.2 présente la variation de la puissance para port la charge avec MPPT

Type de système	Système photovoltaïque Avec MPPT P&O					
Paramètre	MPPT	hacheur		GPV		Puissance idéal
	d	E	P	E	P	
Valeurs	0.001	0.000328	220	0.000354	226.9	0.0001419

**Tableau 4.2** : la variation de la puissance para port la charge avec MPPT.

Le tableau 4.3 présente la variation de la puissance para port la charge sons MPPT

Type de sécurit	SYSTEME Sons MPPT P&O				
Paramètre	hacheur		GPV		Puissance idéal
	E	P	E	P	
Valeurs	9.115E-005	63.19	0.0001056	63.47	0.0001419

**Tableau 4.3** : la variation de la puissance para port la charge sons MPPT .

En remarque toujours le système photovoltaïque donne la puissance max se que exprimer le rôle de la commande MPPT.

## A.3) Résultats de la simulation a la sortie du générateur photovoltaïque :

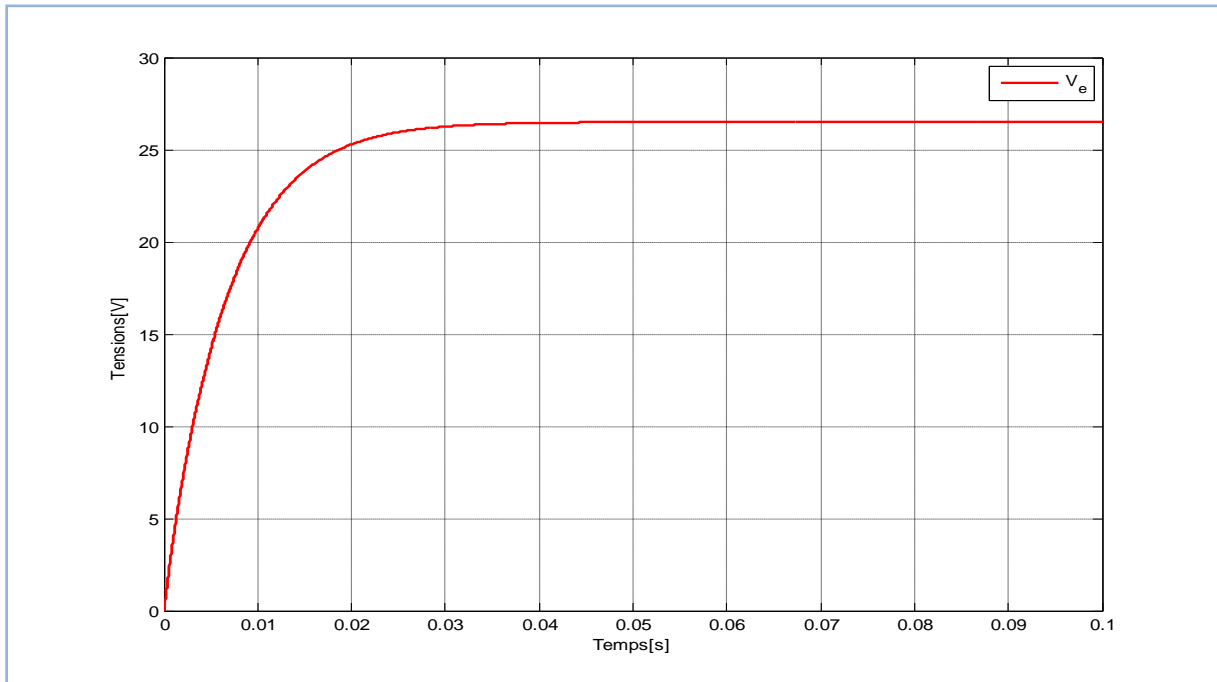
Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » représentent par les figures (4.9) à (4.14). Ces figures représentent la tension, le courant et la puissance générées par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension, le courant et la puissance à la sortie du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur et la commanda MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles.

L'hacheur survolteur fournie une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque. Et la commande MPPT adapte le

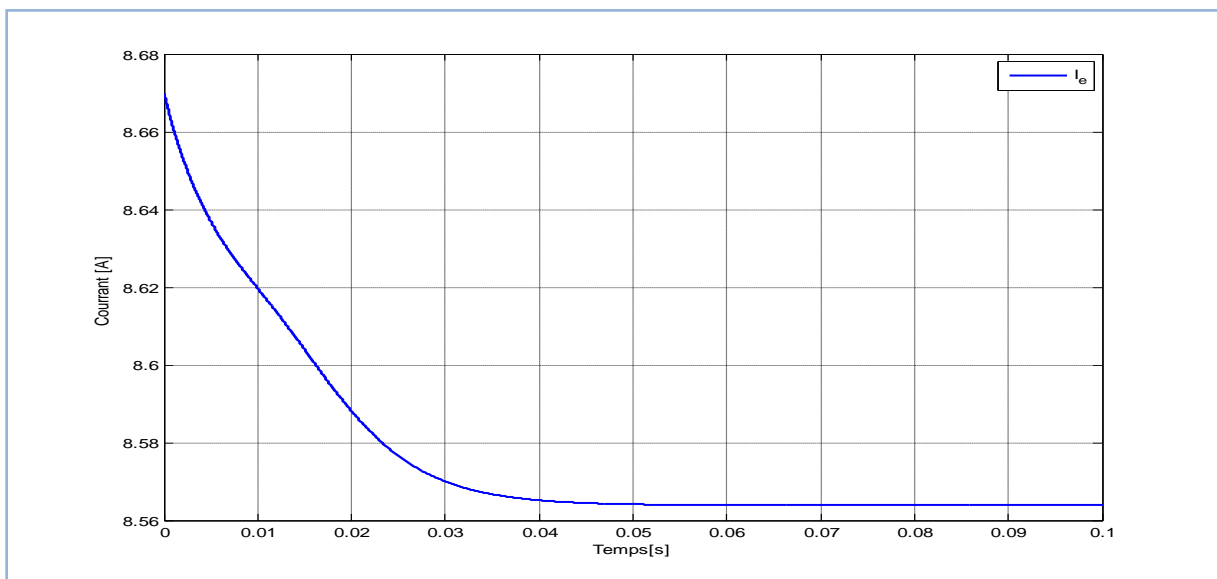
générateur PV à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

## 1- Système Photovoltaïque avec MPPT

### 1.1 Résultats a la sortie du GPV avec MPPT:

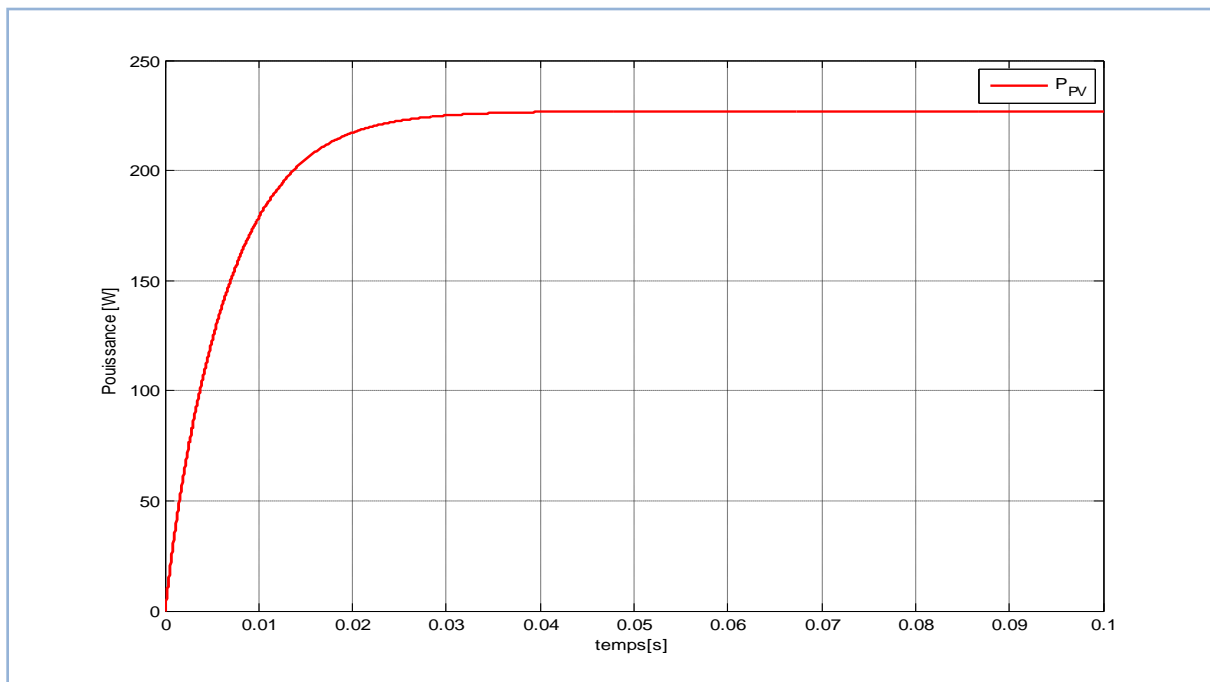


**Figure 4.9:** Résultats de simulation de la tension générée par le générateur photovoltaïque pour  $E=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}+273.15$ .



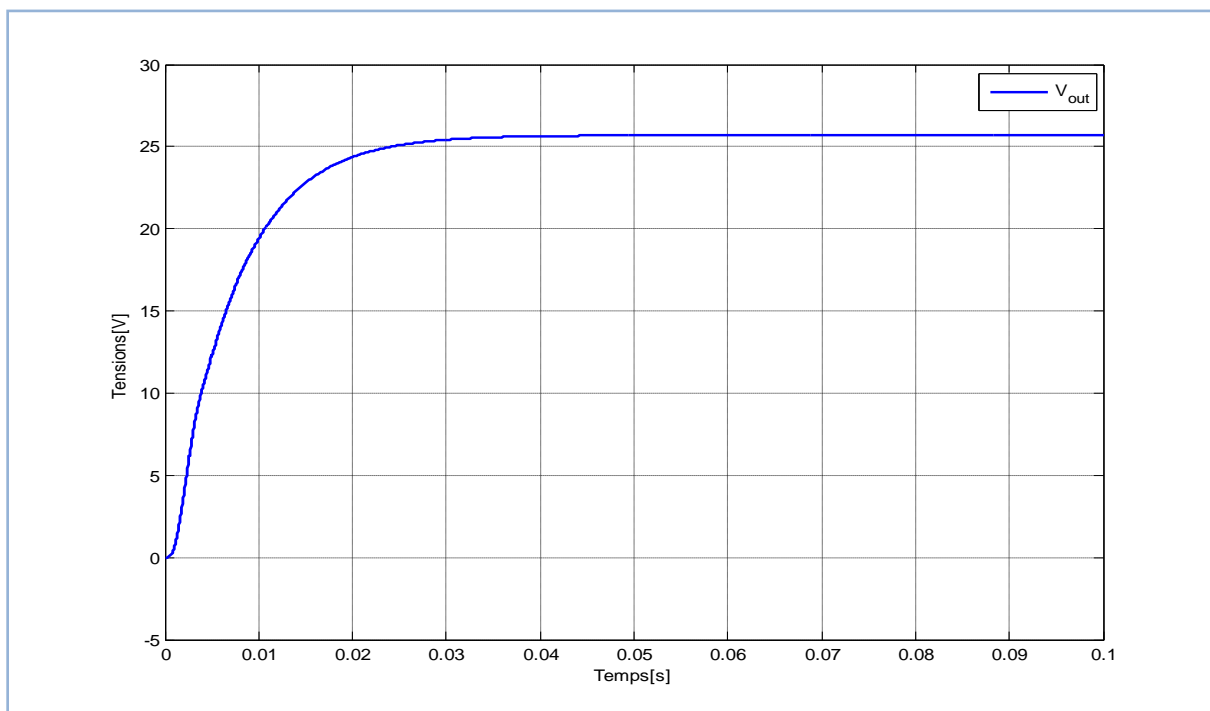
**Figure 4.10 :** Résultats de simulation du courant généré par le générateur

photovoltaïque pour  $E=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}+273.15$ .

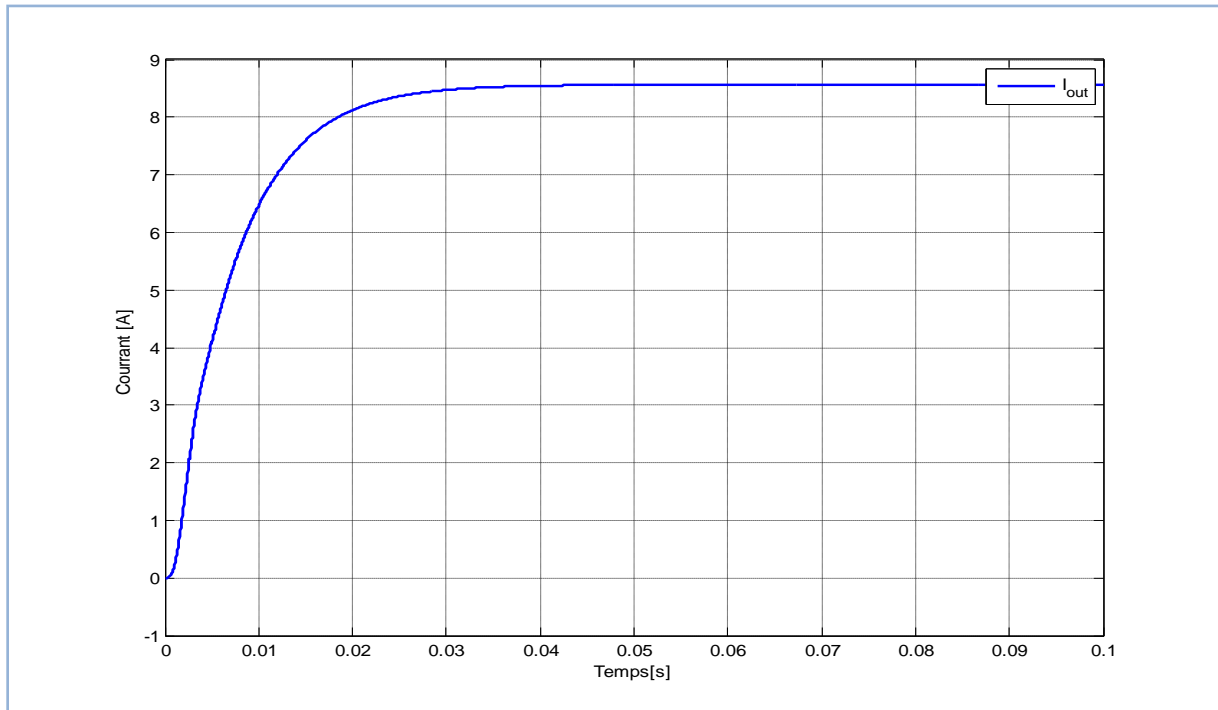


**Figure 4.11 :** Résultats de simulation de la puissance générée par le générateur photovoltaïque pour  $E=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}+273.15$ .

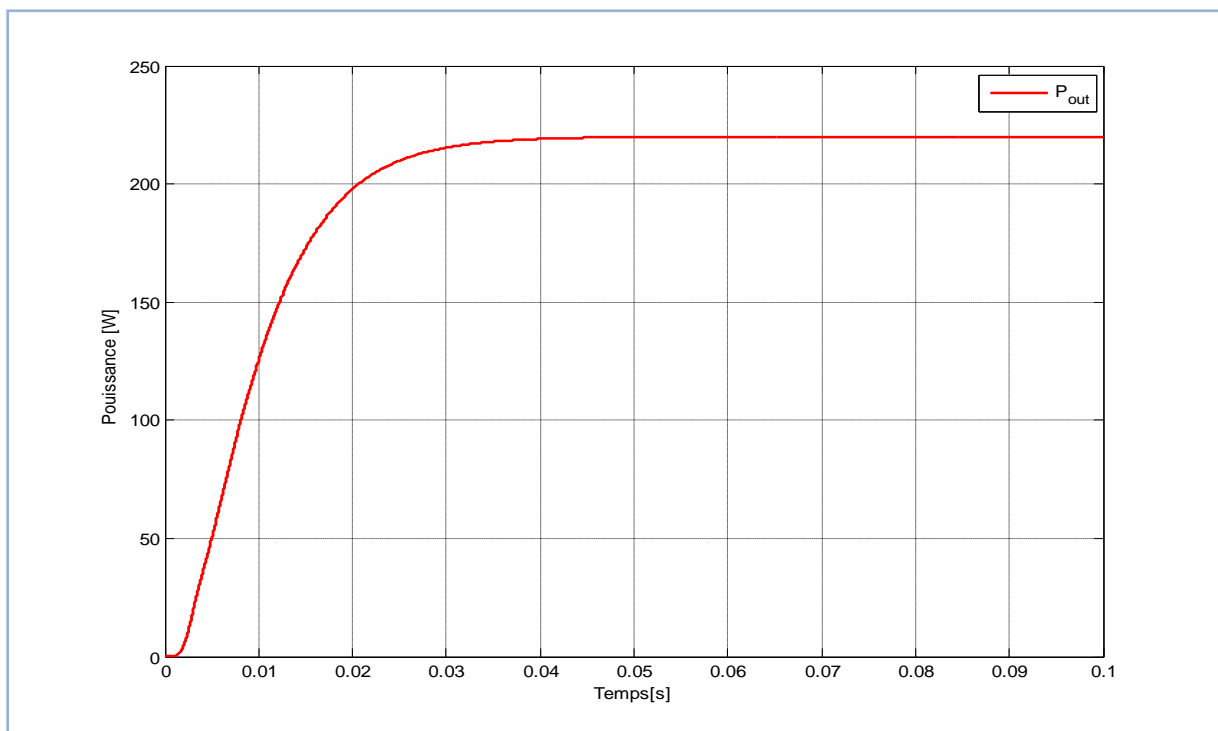
### 1.2 Résultats a la sortie du convertisseur avec MPPT:



**Figure 4.12:** Résultats de simulation de la tension de sortie du système pour  $E=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}+273.15$ .



**Figure 4.13** : Résultats de simulation du courant de sortie du système pour  $E=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}+273.15$ .

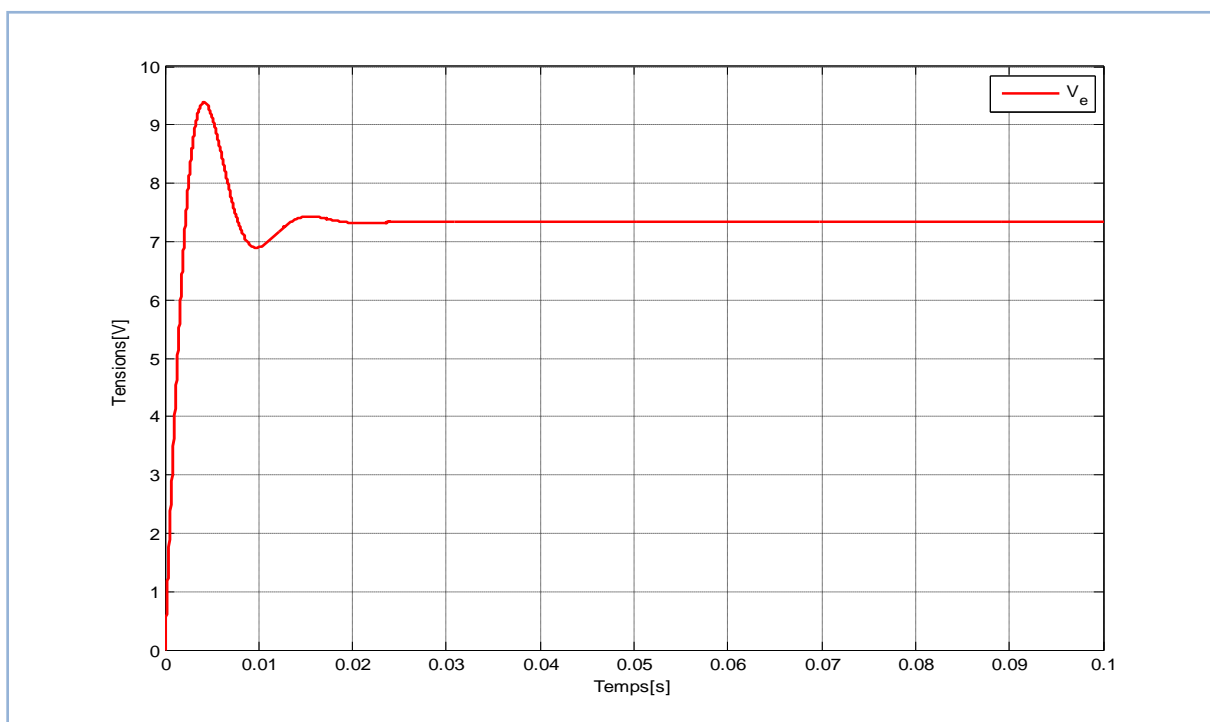


**Figure 4.14** : Résultats de simulation de la puissance de sortie du système pour  $E=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}+273.15$ .

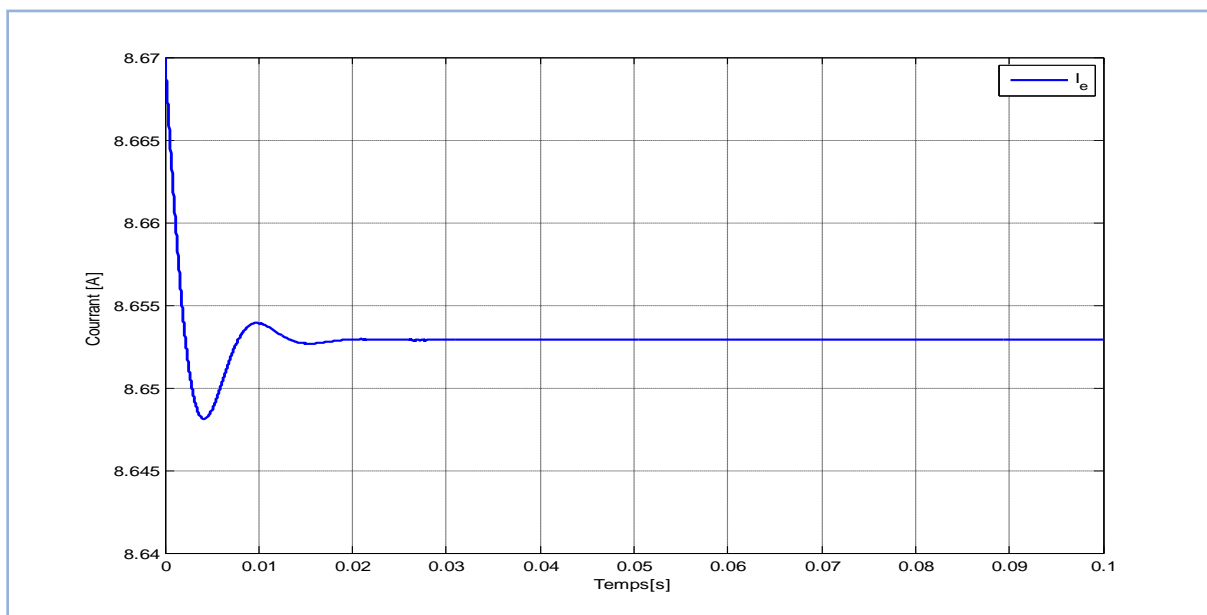
## 2. Système Photovoltaïque sous MPPT

Les résultats de simulation du système photovoltaïque sous la commande MPPT « perturbation et observation » représentent par les figures (4.15) à (4.20). Ces figures représentent la tension, le courant et la puissance générés par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension, le courant et la puissance à la sortie du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur sous la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles.

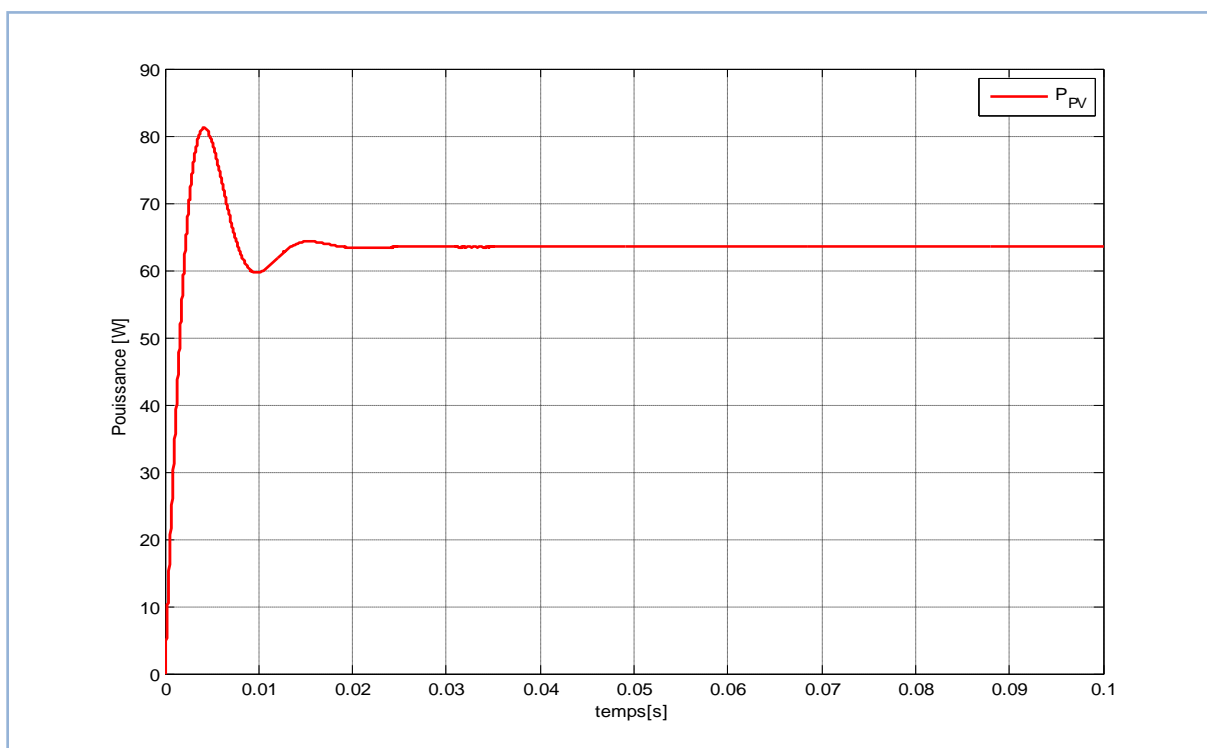
### 2.1 Résultats a la sortie du GPV sous MPPT:



**Figure 4.15:** Résultats de simulation de la tension générée par le générateur photovoltaïque pour  $E=1000\text{W}/\text{m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}+273.15$ .

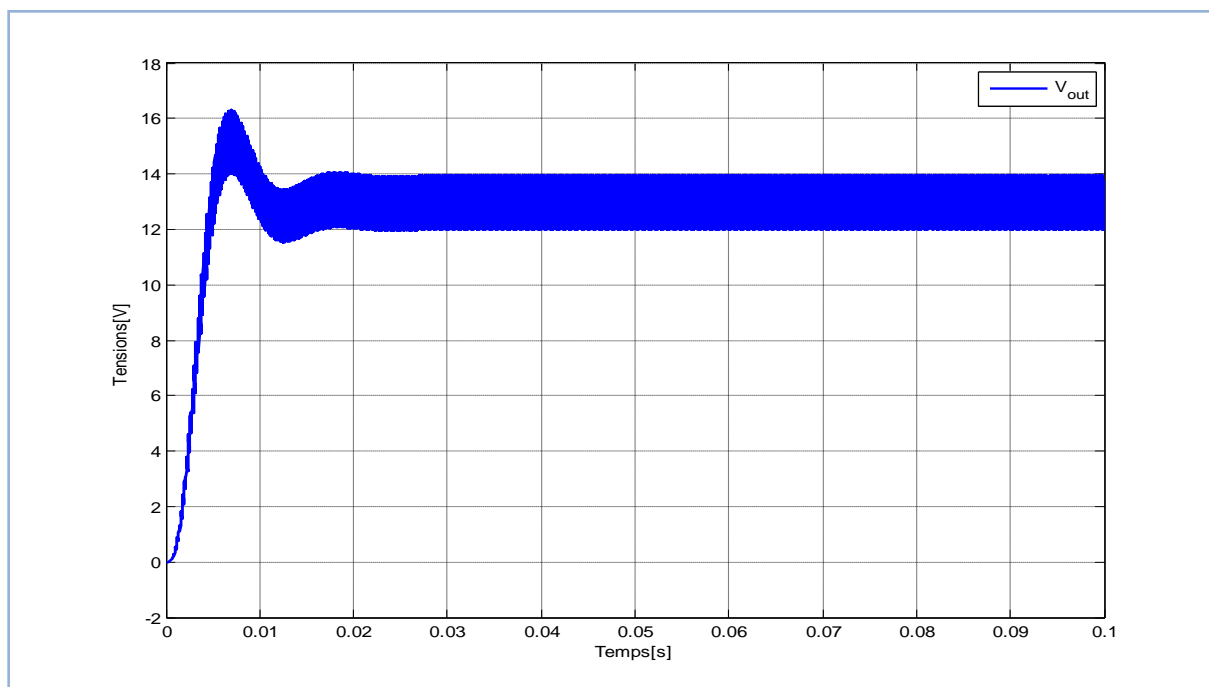


**Figure 4.16:** Résultats de simulation du courant généré par le générateur photovoltaïque pour  $E=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}+273.15$ .

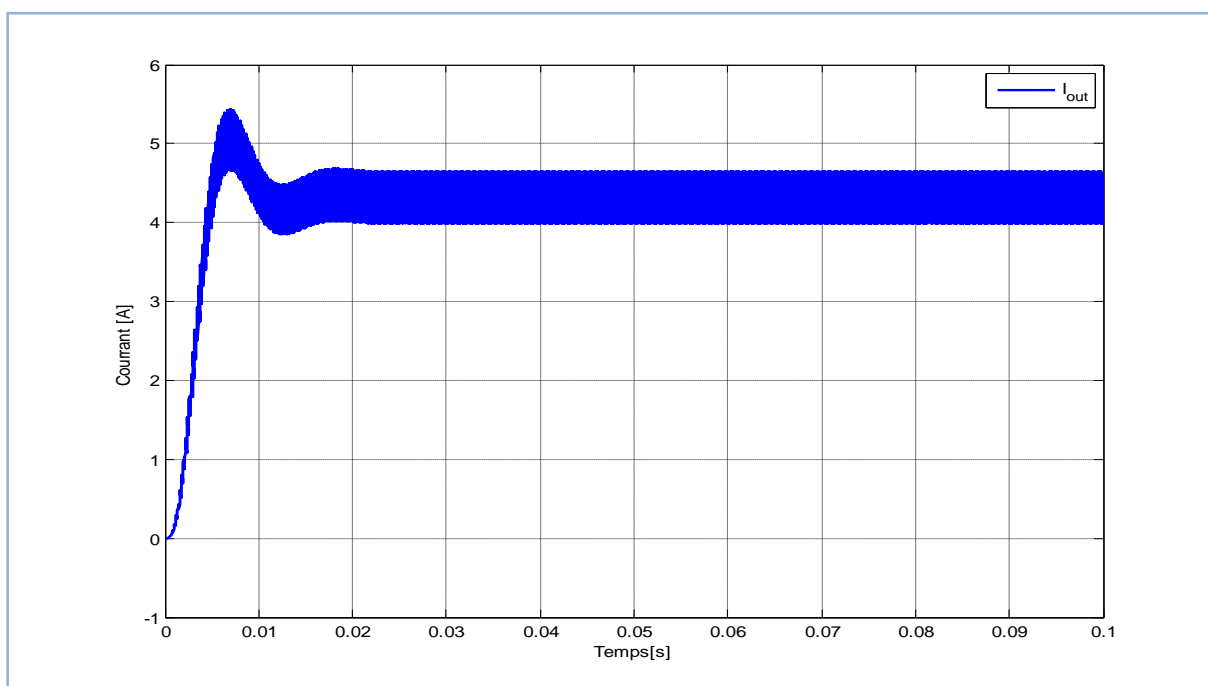


**Figure 4.17:** Résultats de simulation de la puissance générée par le générateur photovoltaïque pour  $E=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}+273.15$ .

**A. Résultats a la sortie du convertisseur avec MPPT:**

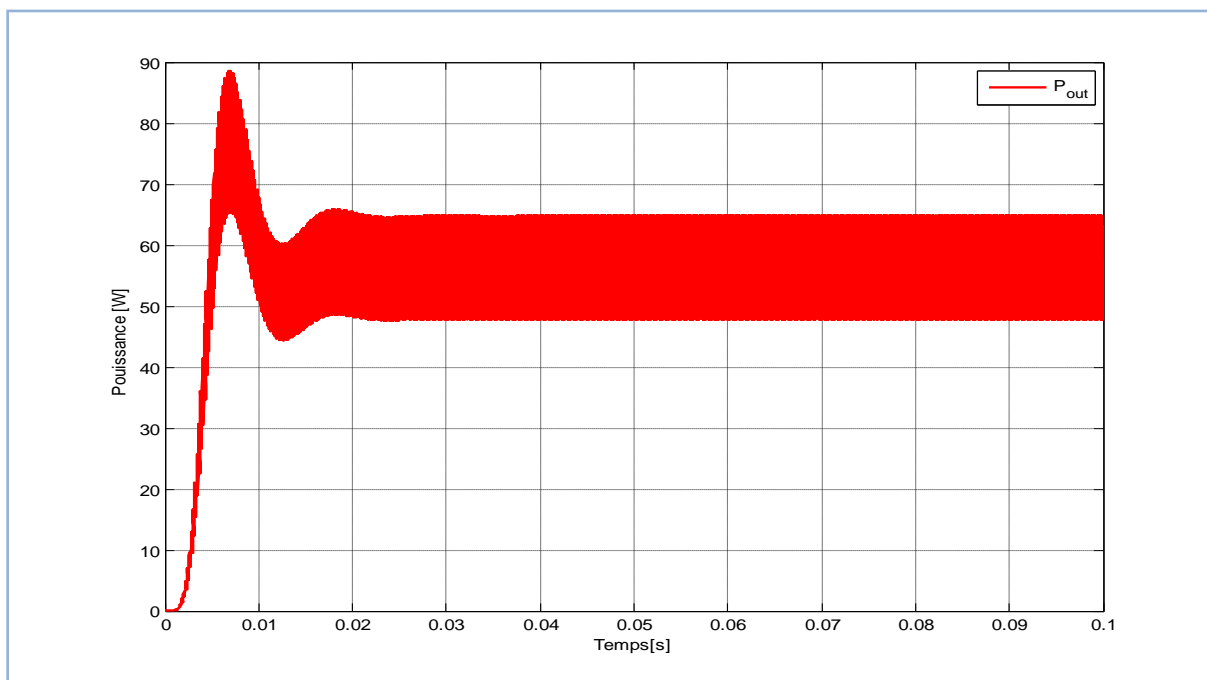


**Figure 4.18 :** Résultats de simulation de la tension de sortie du système pour  $E=1000W/m^2$  et  $T=25^{\circ}C+273.15$ .



**Figure 4.19 :** Résultats de simulation du courant de sortie du système pour  $E=1000W/m^2$  et  $T=25^{\circ}C+273.15$ .





**Figure 4.20** : Résultats de simulation de la puissance de sortie du système pour  $E=1000\text{W}/\text{m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .

**D'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque :**

- A travers les courbes précédentes on remarque que la tension a la sortie du convertisseur est environ quatre fois supérieure à celle de la sortie du panneau et cela grâce au hacheur Boost qui a le rôle d'élever la tension tout en gardant la même puissance, avec une faible diminution à cause des pertes au niveau des composants et la commande utilisée.
- Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur sous la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles plus performance aux système photovoltaïque sous MPPT.
- Les performances du générateur PV se dégradent avec l'augmentation de la puissance. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement  $1000\text{W}/\text{m}^2$  température  $25^\circ\text{C}+273.15$ .
- Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV.
- La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

- Ensuite on remarque d'après des résultats ,l'influence du MPPT sur l'amélioration de la tension et du courant injectés au system Photovoltaïque

### 4.1.3 Onduleur triphasé commande MLI

Dans cette section nous appliquons le principe de modulation de largeur d'impulsion (la commande MLI) sur un onduleur triphasé. Les tensions issues seront à trois niveaux.

Les résultats de la simulation avec Matlab/SimPower System sont représentés dans la figure (4.21).

La simulation du block sous Matlab a donné ces résultats :

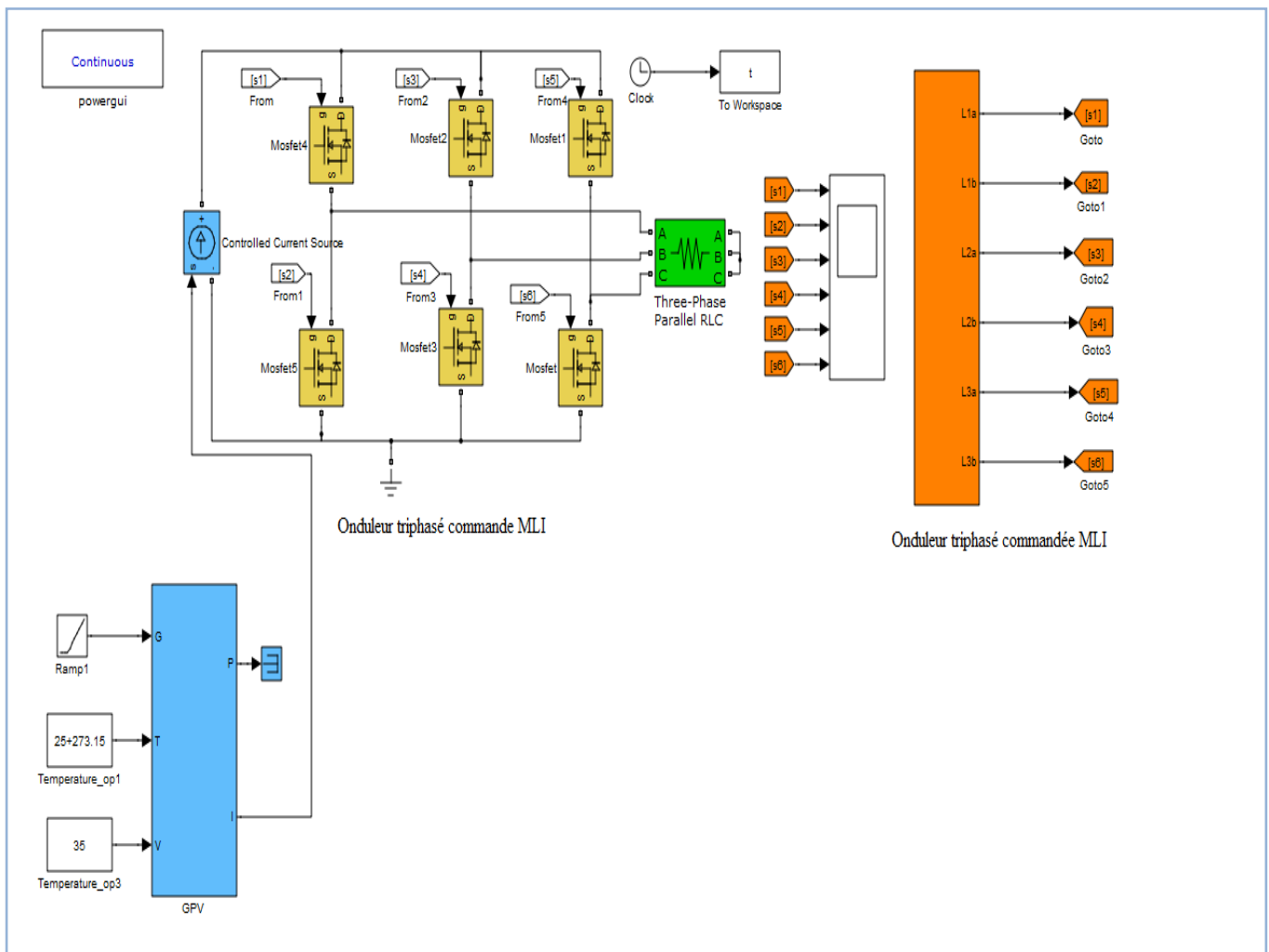
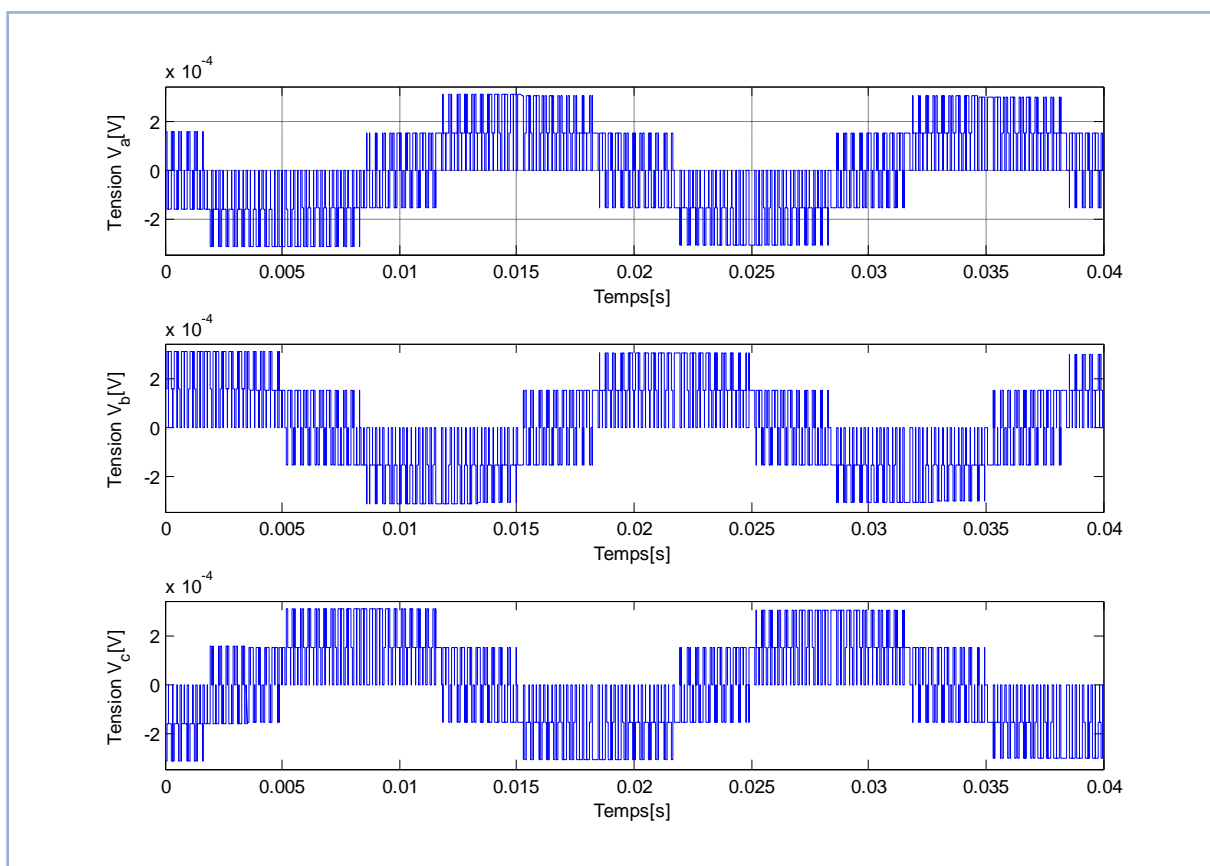


Figure 4.21 : Simulation d'onduleur commandé MLI.

## Résultat de Simulation

Exemple de performance système sont Onduleur commandé par MLI raccordée aux sytème 3-phase RLC .

La figure 4.22, représente Model de la simulation du block sous MATLAB a donné ces résultats :



**Figure 4.22 :** Model du Simulation Onduleur triphasé commande MLI Matlab/SimPowerSystem.

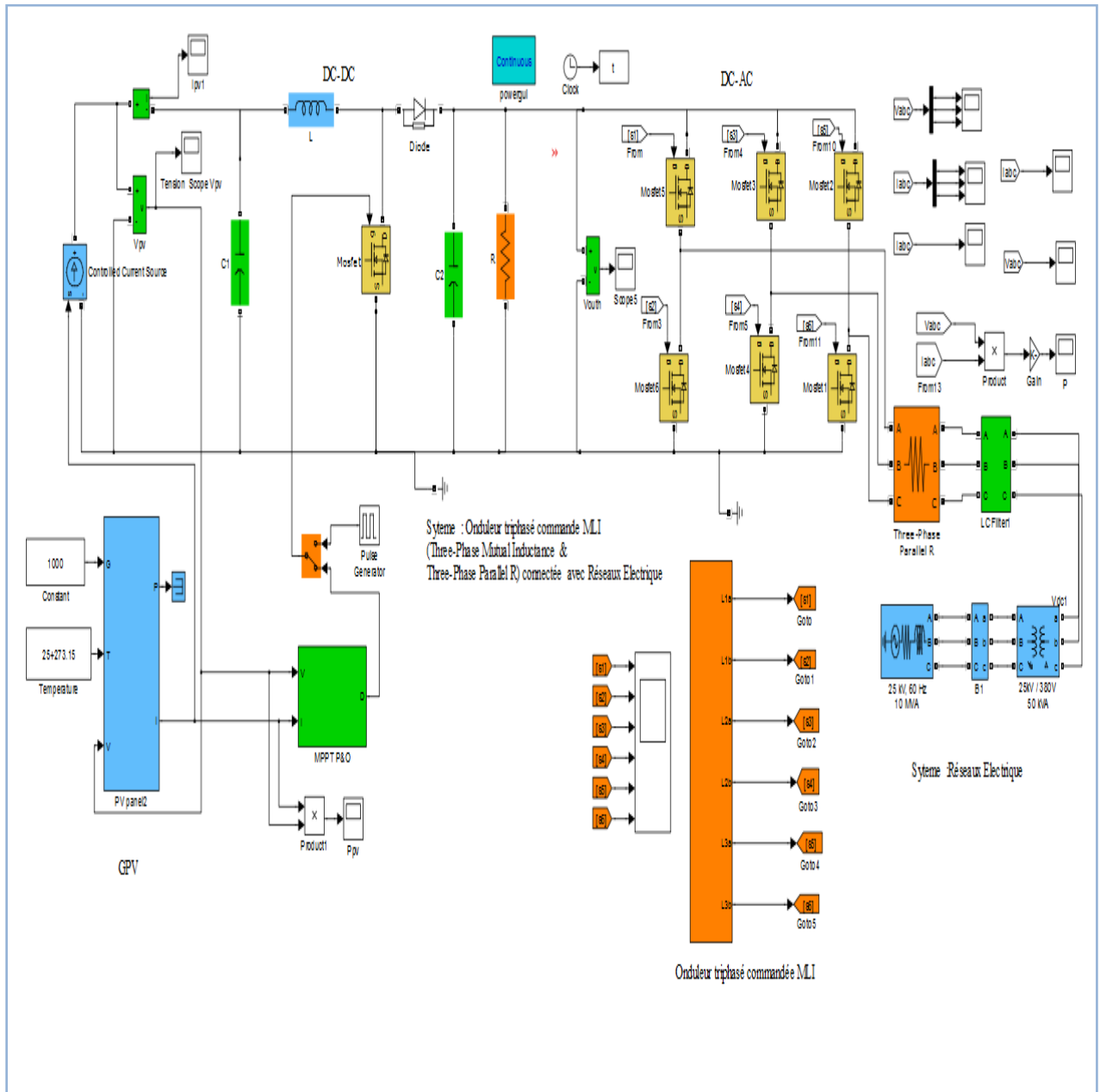
## 4.2 Système photovoltaïque connecté au réseau :

### 4.2.1 Modélisation du Système globale sous MATAB-SIMULINK

La modélisation de l'ensemble du système photovoltaïque adapté par la perturbation et observation » présenté à la figure (4.23).

**Schéma bloc :**

La figure (4.23) , représente le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque commande MPPT:



**Figure 4.23 :** Model du schéma block global de simulation d'un système photovoltaïque adapté par l'MPPT et connecté au réseau électrique sous Matlab/Simulink .

Dans cette simulation on a utilisé un champ photovoltaïque raccordé à un réseau de 25 kV, 60 Hz 10 MVA, un hacheur boost caractérisé par : ( $L=69e^{-6}$  H,  $C1=550e^{-6}$  F,  $C2=550e^{-6}$  F,  $R_{\text{adaptation}}=50 \Omega$ ) commandé en MPPT de type P&O et un onduleur triphasé commandé en MLI, et on a utilisé un filtre LC ( $l=40\text{mH}$ ,  $C=1\text{F}$ ). Connecté au réseaux électrique des paramètres (25 kV, 60 Hz 10 MVA) et transformateur des paramètres (25kV / 380V 50 kVA)

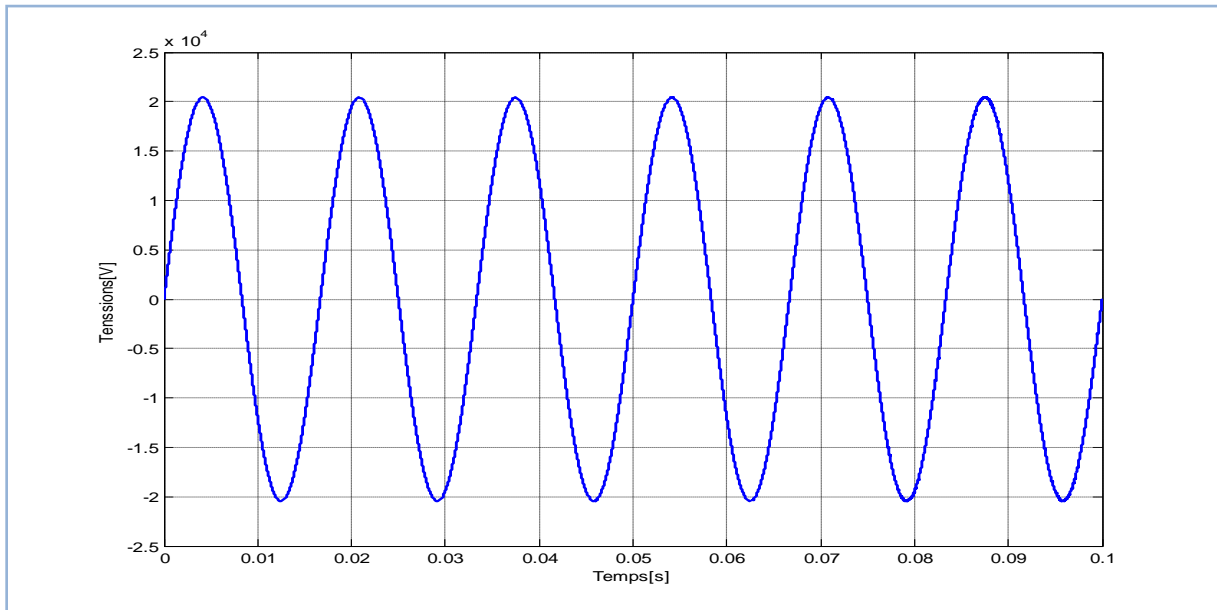
#### 4.2.2 Résultats de la simulation

Les résultats de simulation du système photovoltaïque sous la commande MPPT « perturbation et observation » représentent par les figures (4.24) à (4.28). Ces figures représentent la tension, le courant et la déphasage de courant et tension entre une seule phase de réseau. . Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur sous la commande MPPT « perturbation et observation » puissance d'une system photovoltaïque accordé aux réseaux électrique effectuent correctement leurs rôles .

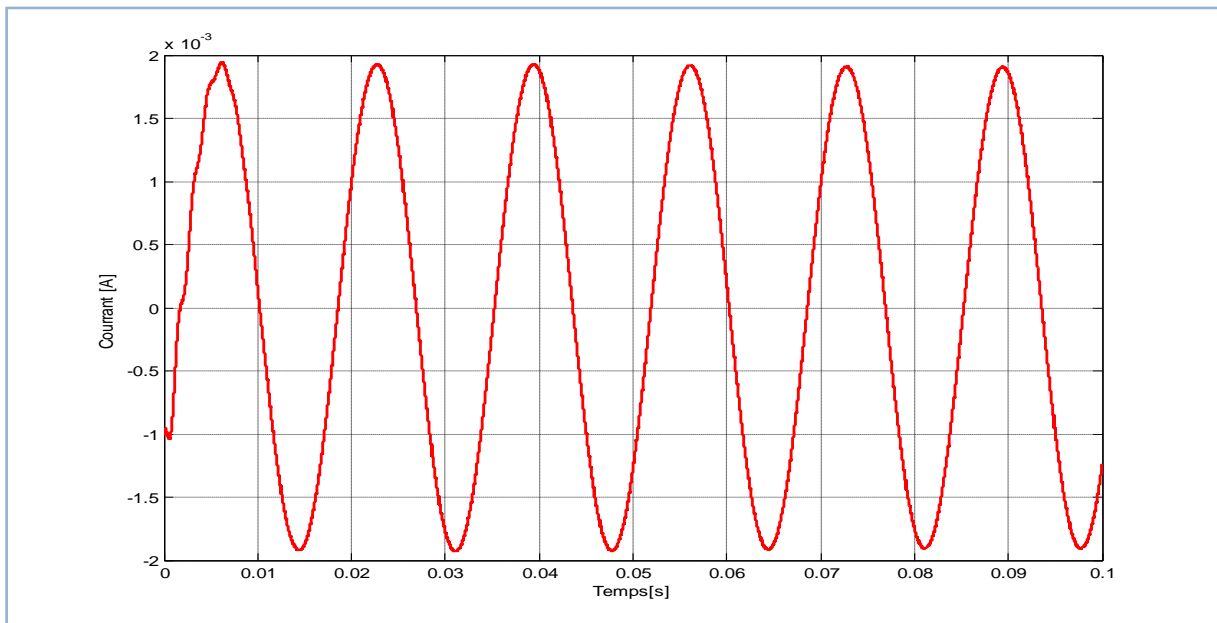
Dans cette partie on simule le comportement de notre système face à une luminosité  $E$  et une température  $T$  constantes, Les conditions atmosphériques sont fixées à  $25^\circ\text{C}$  et  $1000 \text{ w/ m}^2$  .

Ce système était simulé et il a donné les résultats présentés dans les figures suivantes:

a) La tension de la charge est :

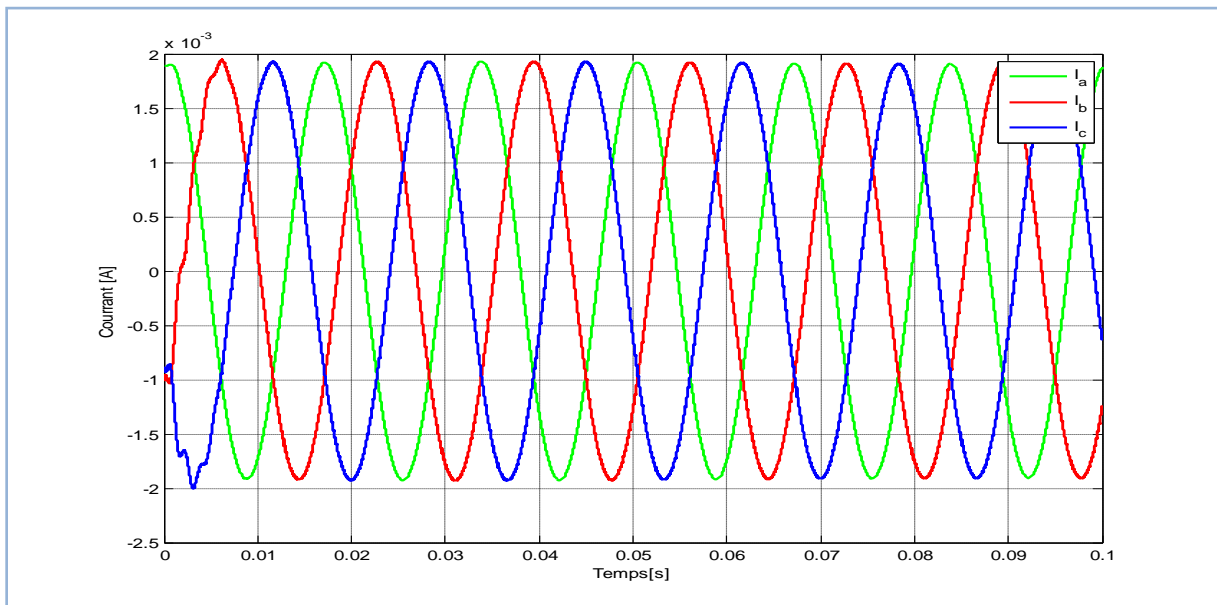


**Figure 4.24 :** Résultats de simulation du courant de sortie onduleur du système PV courbe de courant entre une seule phase de réseau



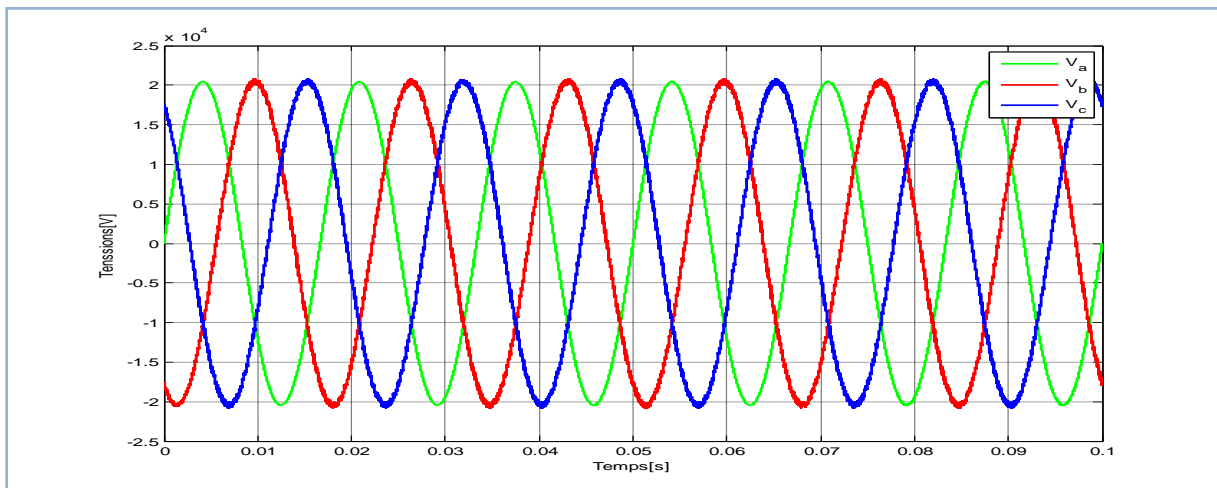
**Figure 4.25 :** Résultats de simulation de la tension sortie onduleur du système PV courbe de tension entre une seule phase de réseau.

Les courants de trois phases ( $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ ) sont illustrées dans la figure suivante :



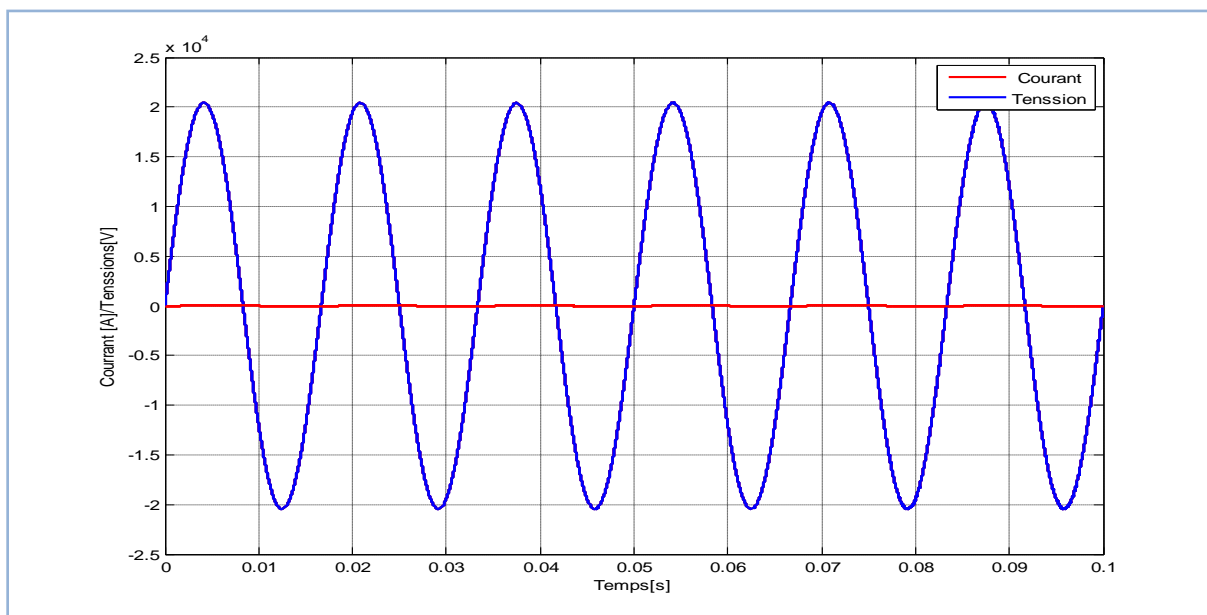
**Figure 4.26 :** Résultats de simulation du courant de réseau électrique  $3\Phi$

Les tensions de trois phases ( $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ) sont illustrées dans la figure suivante :



**Figure 4.27 :** Résultats de simulation de la tension de réseau électrique  $3\Phi$ .

Le déphasage de courant et tension entre une seule phase de réseau sont illustrées dans la figure suivante :

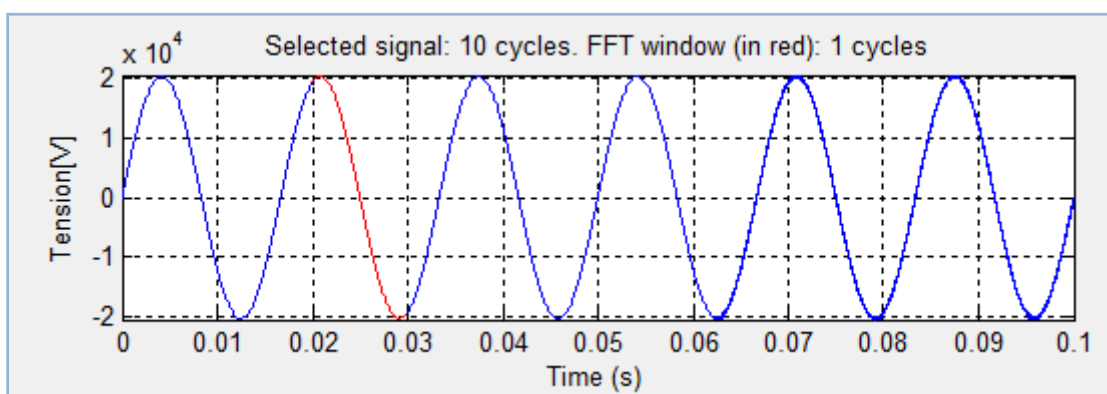


**Figure 4.28 :** Déphasage de courant et tension entre une seule phase de réseau.

On remarque que les courbes de courants et tension sont des courbes sinusoïdales et la figure (4.28) ne montre aucun déphasage entre le courant et la tension d'une seule phase de réseau électrique.

#### b) Analyse Harmoniques :

Les objectifs du convertisseurs sont achevés, à savoir la minimisation de distorsion harmonique des courants et tension générés, les figures (4.30 et 4-32) montre l'analyse spectrale des courants de sortie de la génératrice.



**Figure 4.29 :** La tension de ligne de la charge



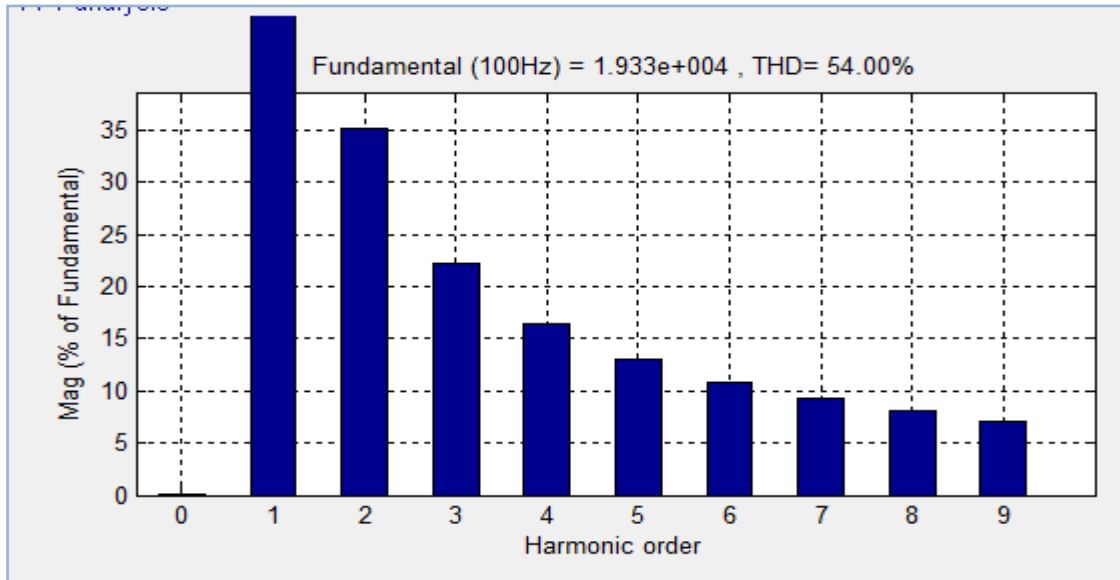


Figure 4.30 : Spectre de la tension de la charge

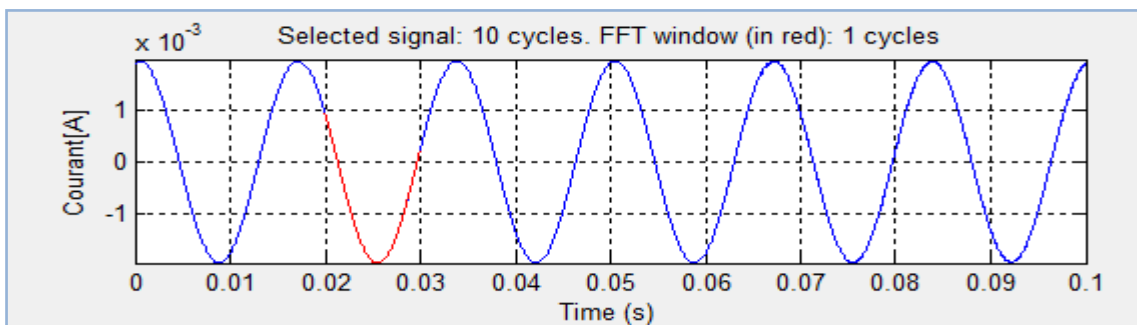


Figure 4.31: Le courant de ligne de la charge

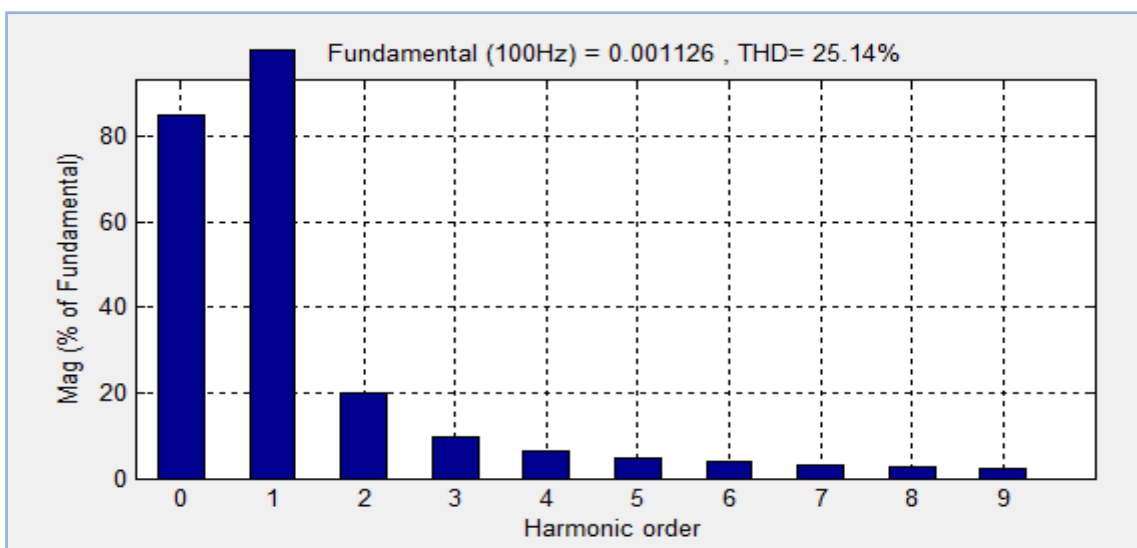


Figure 4.32 : Spectre du courant de la charge

D'après la figure (4.32 et 4.34) on observe la forme déformée de la tension et du courant injecté au réseau fourni sont sinusoïdaux et équilibrés. La mesure du THD des deux gradeurs donne pou la tension 54.00% et pour le courant 25.14%. Finalement nous pouvons conclure que ces résultats sont d'une grande importance pour la gestion de ce type système proposé.

### 4.3 Conclusion:

Dans ce chapitre, les composants proposés de système sont mis en application dans des environnements de logiciel MATLAB/SIMULINK et nous avons présenter la simulation du système photovoltaïque connecté au réseau avec l'illustration des différentes opération que subit la tension produite par le générateur PV à fin de satisfaire les besoin de la charge. Le problème des harmoniques a été présenté, l'analyse spectrale du courant et de la tension de réseau ont montré l'effet de la perturbation harmonique sur la qualité de l'énergie fournir par le GPV et les résultats de simulation ont montré l'efficacité de l'ajout d'une méthode MPPT P&O au convertisseur BOOTS et l'onduleur commandé par MLI pour améliorer la qualité de la tension et du courant injectés au réseau. Les résultats obtenus de courant et tension et la courbe de point fonctionnement maximal par la simulation sont très suffisants, et se rapprochent à ceux présentés dans la littérature.

## *Conclusion générale*

## *Conclusion générale*

Le travail qu'on a présenté dans ce mémoire est basé sur l'analyse d'une modélisation et la simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque (PV) commander par une technique MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV. En effet, pour la conception des systèmes photovoltaïques, la donnée la plus utile est rayonnement solaire reçu par le panneau photovoltaïque solaire, donne des généralités sur les systèmes PV, l'effet PV, principe de cellule PV, Ainsi, les avantages et les inconvénients.

Nous avons étudiions le modèle moyen du convertisseur DC-DC boost qui fournit une tension continue. Le choix du convertisseur élévateur (BOOST) après l'analyse mathématique de la différente configuration des convertisseurs DC-DC nous a facilité la tâche de l'algorithme MPPT en Simulink. Ainsi que ce convertisseur présente l'avantage d'être un élévateur et abaisseur de tension ce qui permet à ce système de s'adapter aux changements météorologiques et pour extraire le maximum de puissance disponible et un autre convertisseur onduleur DC/AC monophasé en mode commuté pour systèmes connectés au réseau en termes des énergie produise. Le modèle du MPPT est basé sur un convertisseur DC /DC et un algorithme de recherche de point de puissance maximal. Ainsi, la conception du système phovoltaïque raccordée au réseau électrique .

Finalement, les résultats de la simulation PV on a démontré l'intérêt d'un dispositif de recherche de la puissance maximale. La méthode P&O (perturbation and observation) a été choisie pour implanter un algorithme de poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale du panneau PV (MPPT).

D'après les résultats de la simulation obtenue, on peut dire que :

- Le système photovoltaïque est relié le réseau de service beaucoup d'exigences comme la stabilité du système de puissance et la qualité de puissance sont des demandes primaires.
- Les performances du panneau PV se dégradent avec l'augmentation de la température et la diminution de l'intensité d'éclairement et les variations de la charge.
- Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions statique standards (CS) : éclairement  $1000\text{W/m}^2$  et  $T = 25^\circ\text{C}$ .
- Le convertisseur survolteur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le panneau PV.
- Ces résultats, forts intéressants, montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.

Comme perspectives nous recommandons la réalisation pratique et d'améliorer l'algorithme et d'essayer de créer un prototype pour une réalisation expérimentale.

*Référence*

*Bibliographiques*

*Référence Bibliographiques :*

- [1] Sadi Mohammed El Amine & Hamlat Zohra , « L'impact Des Energies Renouvelables Sur Le Réseau Electrique Ouest Algérien 220 KV » Mémoire de de Master (LMD) Spécialité : Systeme Energetique, Filière : Genie Electrique. Université Dr .Tahar Moulay de Saïd à Faculté de Technologie. 2013-2014.
- [2] Hadjab Moufdi, « Développement des performances d'un système Photovoltaïque » Mémoire de magister , Spécialité : Electronique. Intitulé : Ecole Doctorale " Matériaux et Composants" option : Matériaux et Composants Optoélectronique .Université Djillali Liabès –Sidi Bel-Abbès Faculté des Sciences de l'Ingénieur 2011.
- [3] Mayouf Somia « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle », Mémoire de master. Université Mohamed Boudiaf - M'SILA. 2016.
- [4] [www.futura-sciences.com](http://www.futura-sciences.com), maison écologique, dossiers, chauffage-chauffe-eau-solaire- bon-choix-coup-792, page 2, 2017.
- [5] H. BENZAGHOU, « Etude a-b initio des propriétés structurales, électroniques des semi-conducteurs chalcopyrites  $CuGaX_2(X=S, Se)$  », Mémoire de Magister en Physique, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2012.
- [6] S. Alem-Boudjemline, « Réalisation et caractérisation des cellules Photovoltaïques plastiques », thèse de doctorat, université d'Angers, 2004
- [7] <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaïque>.
- [8] Goar Noureddine & Mahmoudi Abdelkader, « Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque » ,Mémoire de Master Spécialité: Génie Electrique ,Filière: Systèmes Electriques et Automatiques ,Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi , Juin 2017
- [9] Ghaitaoui Elmoulat & Khelifi Houdac , « Alimentation d'un Moteur Asynchrone à partir d'un Générateur Photovoltaïque », Mémoire de Master Filière : Electrotechnique Spécialité : Commande Electrique, 23 Juin 2019
- [10] [http://www.solimp-be.net/solimp\\_tech.htm](http://www.solimp-be.net/solimp_tech.htm).
- [11] Lahlah Salah, « Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incremental Conductance (Inc.CoN) et Hill climbing (H.C) », Mémoire de Magister en Électrotechnique, Option : Maitrise des Energies, Université de Batna, 2007.
- [12] Amrani Abderrahim & BEN GLIA Ramdane, «Modélisation d'un système photovoltaïque relié au réseau : Contrôle des puissances active et réactive » , Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued. 2016/2017 .

- [13] Salaheddine Bensalem ,« Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires » ,Mémoire de magister en énergétique et mécanique des fluides, universite ferhat abbas, setif, 2011
- [14] H. Belghitri ,« Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque » mémoire de magister, 2009.
- [15] Belkadi Nora & Akli Karima ,« Contrôle indirect d'un panneau solaire isolé du réseau » Mémoire de Fin d'Etudes de Master Academique, Domaine : Sciences et Technologies Filière : Electrotechnique Spécialité : Machines Electriques , Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2018.
- [16] Cedric. Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de doctorat en Génie Electrique, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, U.F.R. Physique Chimie Automatique , 2008.
- [17] Q. M. Huynh, « Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour un site isolé », Thèse de doctorat, Spécialité : Automatique, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2012.
- [18] Abdelhakim. Belkaid, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome », Thèse de doctorat, Option: Electrotechnique, Université Sétif 1, Département d'Electrotechnique 2015.
- [19] S. Makhloufi : « Contribution à l'optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes» ; Thèse de doctorat, Université de Batna, 2013.
- [20] Nakoul Zakia, « Optimisation D'une Centrale Solaire A Base D'un Generateur PV » [Application Aux Sites Tlemcen Et Bouzaréah], mémoire de magister en Physique. Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen. Faculté des Sciences, 2010
- [21] Tarek Bouguerra , « Optimisation d'un système photovoltaïque : Application en continu et en alternatif »Mémoire de Magister en Electrotechnique Option : Modélisation et contrôle des procédés de conversion de l'énergie électrique ,Université Mentouri de Constantine ,2014.
- [22] Narimene. Debili, « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque ».Mémoire de magister en Electronique, Option: Matériaux et nanoélectronique, Université de Constantine I.2014/2015.
- [23] BENDIAB Saddek&ATMAOUI Nassim, «Commande d'un Hacheur Boost a deux entrees», diplôme master en électrotechnique , Université Abderrahmane MIRA-BEJAIA. 2017/2018.
- [24] F.Bouchafaa, « Cours Électronique de puissance », [http : //www.usthb.com](http://www.usthb.com), 2008/2009.



- [25] Hadjeras Mouloud & Khales Aissa, « Etude et dimensionnement d'un convertisseur dédié aux systèmes photovoltaïques » Mémoire de Master Domaine : Sciences et Technologies Filière : Génie Electrique Spécialité : Réseaux électriques. Université mouloud mammeri de tizi-ouzou, 2017.
- [26] Ndiaye Papa Amadou et Kawther Achari , « Production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque ». MEMOIRE de MASTER Domaine : Sciences et Technologie Filière : Electromécanique Spécialité : Electromécanique , Université 8 Mai 1945 – Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie , 2018/2019.
- [27] Meddah M, Bourahla M., Bouchetata N., « Synthèse des convertisseurs statiques dc/ac pour les systèmes photovoltaïques ». Revue des Energies Renouvelables.2011.
- [28] Zaiem Kamar , « Commande d'un système photovoltaïque par contrôleur Neuro-Flou Réduit » , MÉMOIRE de Master Faculté : Sciences de L'Ingéniorat Département : Électromécanique. Université Badji Mokhtar- Annaba . 2019.
- [29] Abid Ayyoub& Bechlaghem Yassine, « Etude et dimensionnement d'un convertisseur SEPIC pour une application photovoltaïque », Mémoire de Master, Spécialité : Electrotechnique Option : Réseaux électriques et réseaux électriques intelligents , Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 2017.
- [30] Belkacem Mourad, « Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT) », Mémoire de Master, Spécialité : Matériaux, Systèmes et Energies Renouvelables, faculté des sciences département de physique, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2015.
- [31] Nettari Yakoub , « Commandes robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Option : Commande Electrique, Université Ferhat Abbas — Setif1 Ufas1 Faculté de Technologie, 2014.
- [32] L. Protin, « Convertisseurs photovoltaïques », Technique de l'ingénieur, traité génie Électrique 2001.
- [33] Christian Bissieres, « Conversion statiques des énergies, Physique Appliquée », <http://www.cbissprof.free.fr>.
- [34] Othmane Benseddik & Fathi Djaloud « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master, Spécialité : Génie électrique et électronique , Option : Automatique , Université de Ouargla, 2012.
- [35] Mechalikh Med Nadjib & Hamada Charaf Eddine, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecte au réseau », Mémoire de master , Domaine : sciences et technologies , Filière : Génie électrique , Spécialité: Machine électrique et électronique de puissance , Université Kasdi Merbah Ourgla 2013.

- [ 36 ] Abbassen Lyes « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque » mémoire de Magister en électrotechnique ,Option : Machines Electriques, Université de Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, 2011.
- [37] Jianhong Xu. « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité ». thèse doctorat de L'I.N.P.L spécialité : Génie ElecTrique , Institut National Polytechnique de Lorraine, Français. 1994.
- [38] M. Boudjdaimi «Commande d'un onduleur par des approches basées sur des réseaux de neurones artificiels». Mémoire de magister, Spécialité : Automatique Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, 27/09/2009.
- [39] Ionel Vechiu, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de doctorat Electronique, Electrotechnique et Automatique Spécialité : Génie Electrique , l'université du havre, Paris, décembre 2005.
- [40] Ziani Seyfeddine & Ould Mammar Mohamed, « Etude et simulation d'un hacheur Boost pour suivre le point de puissance maximal (MPPT) ».. Mémoire de Master Mention Électronique Microsystèmes et microélectronique et conception de circuits ,Université saad dahlab de blida , 2016-2017.
- [41] Helali Kamelia, « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Étude comparative » Mémoire de magister en electrotechnique, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2012.
- [42] Lakhdara Amira .« Etude De La Commande De La Puissance Et Stockage D'un Système Photovoltaïque » MEMOIRE de master . Spécialité : Electrotechnique industrielle. Filière : Électrotechnique Badji Mokhtar-Annaba , University Université Badji Mokhtarannaba. 2019.
- [43] Mbaye et Merahi Sawsene, « Etude du fonctionnement et commande d'un système photovoltaïque raccordé au réseau » Mémoire de Master en électrotechnique Option: Commande des machines électriques, Universit E Abou Bekr Belkaid Tlemcen. 2018 – 2019.

# *Résumés*

## Résumé

Dans ces dernières années de l'électronique de puissance c'est largement d'applications. Ses applications deviennent plus intégrées dans les systèmes connectés au réseau, comme les systèmes photovoltaïques (PV) ainsi que la fonction principale est de convertir l'énergie électrique à partir d'un convertisseur statique. Elle joue un rôle important dans la production d'énergie électrique et l'intégration des sources d'énergies renouvelables dans le réseau électrique. Sachant que la puissance du photovoltaïque offre une source d'électricité respectueuse de l'environnement, le suivi du point de puissance maximale MPP. Une modélisation sous Matlab/Simulink des différentes parties du système est proposée.

**Mots-clés :** puissance, photovoltaïques, réseaux électrique, convertisseur statique, point de puissance maximum (MPP) ;

## Abstract

In recent years of power electronics it has been widely used. Its applications are becoming more integrated in grid-connected systems, like photovoltaic (PV) systems as well as the main function is to convert electrical energy from a static converter. It plays an important role in the production of electrical energy and the integration of renewable energy sources into the electricity grid. That the power of the photovoltaic provides an environmentally friendly source of electricity, monitoring the power point of maximum MPP. A modeling under Matlab / Simulink of the different parts of the system is proposed.

**Keywords :** power, photovoltaics, electrical networks, static converter, maximum power point (MPP)

## الملخص :

في السنوات الأخيرة من إلكترونيات الطاقة ، تم استخدامه على نطاق واسع . أصبحت تطبيقاتها أكثر تكاملاً في الأنظمة المتصلة بشبكة الطاقة ، مثل الأنظمة الكهروضوئية (PV) بالإضافة إلى أن الوظيفة الرئيسية هي تحويل الطاقة الكهربائية من محول ثابت . إنها تلعب دوراً مهماً في إنتاج الطاقة الكهربائية ودمج مصادر الطاقة المتجددة في شبكة الكهرباء . مع العلم أن الطاقة الكهروضوئية توفر مصدراً صديقاً للبيئة للكهرباء ، وتتبع أقصى نقطة للطاقة MPP ، يتم التحكم فيه عن طريق إشارة تعديل عرض النبض (PWM). تم اقتراح نمذجة تحت Matlab / Simulink لأجزاء مختلفة من النظام.

**الكلمات المفتاحية :** الطاقة ، الخلايا الكهروضوئية ، الشبكات الكهربائية ، المحول الثابت ، نقطة الطاقة القصوى (MPP).