

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**

*Impact de l'énergie photovoltaïque PV dans un système de conversion d'énergie*

**Présenté Par :**

- Yahiaoui Amina.
- Ladghem Nadia.

**Devant les jurys composés de :**

Mr. AISSOU Massinissa	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Mr.Krim Mohamed	MAA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Mr. Ayache Zouaoui	MAA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur

*Année universitaire 2019/2020*



# *Dédicace*

*Avant tout, je dédie le Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail Que Je dédie.*

*A ma Mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois a travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expérience de mes sentiments et de mon éternelle gratitude. A mon Père et ma mère qui ont sacrifiées toute leur vie afin de me voir grandir et réussir dans le parcours de l'enseignement. Ils ont toujours restées à mes côtés dans les moments rudes de ma vie. Je n'oublierai jamais leurs soutenir.*

*Cependant. Je prie Dieu le Miséricordieux qu'il te portera récompense, car la mienne ne sera guère complète, Et te protège et te garde en bonne santé.*

*A ma grand-mère, que dieu la protège et la garde en bonne santé. A mes grands-pères Rabi yarhamhom. A les plus chères sœurs kawtar et inesse et mes meilleurs frères Omar Et Ahmed.*

*Mes chères amis ; A tous mes oncles et mes tantes ; A mon encadreur Mr Krim Mohamed qui est conseillé et encouragé durant l'évolution de ce travail. Sans oublier tous les professeures que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur. À mon Binôme Nadia et toute la famille "yahiaoui" À tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de cette mémoire.*

*Toute la promotion 2020/2021*

***Amina***





## *Dédicace*

*Avant tout, je dédie le Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail Que Je dédie. A ma Mère“ “, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois a travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expérience de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

*A mon Père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir grandir et réussir dans le parcours de l'enseignement. A mes sœurs et mes frères Nabila ,Omar ,Abdel Kader ,Hafida ,Soria ,Aicha et les petites Ritedj et Mohamed .Son oublier mes chères amis Hanen ,Sabrine ,Dounia ,Fatima et Timoucha ; et toute la famille “Ladeghem“ À tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de cette mémoire.*

*Toute la promotion .*

*Nadia*



# Remerciement

*Nous remercions avant tout Allah de nous avoir gardés en bonne*

*santé afin de mener à bien ce projet de fin d'études. Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'ils ont faits pour que nous terminions nos études.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à notre encadrant Mr Krim Mohamed i pour sa précieuse collaboration et pour ces suivis et ces conseils durant l'évolution de ce travail.*

*Nos remerciements vous aussi Mr B AISSOU pour l'honneur de présider le jury et Mr Ayache comme examinateur.*

*Enfin, nous tenons à remercier vivement toute personne qui nous a aidés de près ou de loin à élaborer et réaliser ce mémoire.*

*A ma femme.*



# *Table des matières*

<i>Dédicaces</i> .....	<i>i</i>
<i>Remerciement</i> .....	<i>iii</i>
<i>Table des matières</i> .....	<i>iv</i>
<i>Liste des symboles</i> .....	<i>vii</i>
<i>Liste des figures</i> .....	<i>viii</i>
<i>Liste des tableaux</i> .....	<i>xiii</i>
<i>Introduction Générale</i> .....	1

## ***CHAPITRE 1 : Généralités sur production l'énergie du système Photovoltaïque***

1. Introduction .....	4
1.1 Production de l'énergie électrique .....	4
1.1.1 Des énergies renouvelables .....	4
1.1.2 Le système photovoltaïque .....	7
1.1.2.1 L'énergie solaire photovoltaïque .....	7
1.1.2.2 Rayonnement solaire .....	7
1.2 Conversion photovoltaïque .....	9
1.2.1 L'effet photovoltaïque .....	10
1.2.1.1 Le principe de conversion photovoltaïque .....	10
1.2.1.2 Principe de fonctionnement de la cellule PV .....	11
1.2.1.3 Les Différents Types de Cellules Photovoltaïques .....	11
1.2.1.4 Générateur photovoltaïque (GPV) .....	12
1.2.1.4.1 Modélisation de la cellule photovoltaïque: .....	13
1.3 Association en série et parallèle d'un module photovoltaïque .....	16
1.4 Caractéristiques électriques d'une cellule .....	18
1.5 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	21
1.6 Conclusion .....	23

## ***CHAPITRE 2: Les Convertisseurs Statique de Puissance***

2.	Introduction.....	24
2.2	Les convertisseurs statiques .....	24
2.2.1	Fonctions de base et terminologie des convertisseurs statiques .....	24
2.2.2	Modélisation des Convertisseurs .....	25
2.2.3	Les différents convertisseurs .....	26
2.2.3.1	Convertisseurs continus-continus (DC/DC) ou Les Hacheurs.....	26
2.2.3.2	Composition du convertisseur [41].....	27
2.2.3.3	Convertisseur Boost.....	30
2.2.3.4	Convertisseur Buck.....	35
2.2.3.5	Convertisseur Buck-Boost.....	38
2.2.4	Comparaison entre les différents types de convertisseur DC-DC.....	41
2.3	Modélisation du hacheur survolteur (boost) d'un système photovoltaïque.....	41
2.4	Electronique de puissance et d'énergie des convertisseurs .....	42
2.4.1	Electronique de puissance .....	42
2.4.2	Convertisseurs des Puissances .....	42
2.4.3	Convertisseurs d'Energie .....	44
2.4.4	Fonctionnement du convertisseur électronique de puissance .....	44
2.5.2	Gestion de la MPPT.....	46
2.6	Cheminement maximum de Power Point (MPPT).....	47
2.6.1	Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque .....	48
2.6.1.1	Les Algorithmes MPPT.....	48
2.7	Les convertisseurs DC/AC (Onduleur).....	49
2.7.1	Principe de fonctionnement d'un onduleur .....	50
2.8	Modulation d'impacte d'énergie du système photovoltaïque connecté au réseau.....	50
2.8.1	Système photovoltaïque relié à une grille .....	50
2.9	Conclusion.....	52

## ***CHAPITRE 3: Simulation et Performance d'impact énergie du système Ptf***

3.	Introduction .....	53
3.1	Modélisation d'un système photovoltaïque .....	53
3.1.1	Le générateur photovoltaïque « GPV ».....	53
3.1.2	Modèle d'une cellule photovoltaïque sous Matlab .....	54
3.1.3	Générateur photovoltaïque .....	56

3.1.3.1	Simulation de modules PV .....	56
3.1.3.2	Simulation des Convertisseurs DC-DC (hacheurs).....	57
3.1.3.3	Modèle moyenné (averaged) du convertisseur boost DC-DC avec contrôle de courant d'entrée.....	59
3.1.3.4	Sélectionnez le meilleur convertisseur DC-AC:.....	61
3.1.4.5	Onduleur DC-AC monophasé pour les systèmes connectent au réseau.....	62
3.2	Simulation et Performance d'un Système Globale du Système Photovoltaïque relié à une Grille.....	63
3.2.1	Résultat de simulation du premier système DC-DC/DC-AC .....	64
3.2.2	Model système deux Convecteurs DC-DC et onduleur DC'AC avec MPPT.....	66
3.3	Conclusion.....	74

<b><i>Conclusion générale</i></b> .....	<b>75</b>
---	-----------

<b><i>Perspectives</i></b> .....	<b>76</b>
----------------------------------	-----------

<b><i>Référence Bibliographiques</i></b> .....	<b>77</b>
--	-----------

***Resumés***

## *Liste des symboles*

<i>Symbole</i>	<i>Unité</i>	<i>Signification</i>
<b>E</b>	<b>[J]</b>	Energie ;
<b>E<sub>g</sub></b>		Énergie de gap ;
<b>c</b>	<b>[m.s<sup>-1</sup>]</b>	Vitesse de la lumière (c= 299 792 458 m / s) ;
<b>λ</b>	<b>[m]</b>	Longueur d'onde (souvent exprimée en micromètre) .
<b>v</b>	<b>[Hz]</b>	Fréquence;
<b>q</b>		Charge de l'électron (1.9*10 <sup>-19</sup> c).
<b>k</b>	<b>[J/K]</b>	Constante de Boltzmann= 1,38064852 × 10 <sup>-23</sup> ;
<b>T</b>	<b>[K°]</b>	Température de la jonction des cellules PV ;
<b>T<sub>n</sub></b>		Température de référence des cellules PV.
<b>B</b>		Facteur d'idéalité de la jonction;
<b>E<sub>g</sub></b>	<b>[ev]</b>	Énergie de gap;
<b>R<sub>s</sub></b>	<b>[ Ω ]</b>	Résistance série
<b>R<sub>p</sub></b>		Résistance parallèle ;
<b>C</b>	<b>[F]</b>	Condensateur ;
<b>ε<sub>0</sub></b>		Permittivité du Vide
		Permittivité Relative (2 à 20000) du diélectrique ;
<b>e</b>		Epaisseur du Diélectrique ;
<b>L</b>		l'inductance ;
<b>μ<sub>0</sub></b>	<b>[SI]</b>	4π.10 <sup>-7</sup> ;
<b>μ</b>		Perméabilité Relative ;
	<b>[m]</b>	Longueur Magnétique Effective ;
<b>N</b>		Nombre de Spires ;
<b>Q</b>		l'interrupteur ;
<b>T<sub>On</sub></b>	<b>[S]</b>	Temps fermée ;
<b>T<sub>Off</sub></b>		Temps ouvert ;
<b>α ou D</b>		Rapport Cyclique ;
<b>I<sub>ph</sub></b>	<b>[A]</b>	Courant- photo
<b>I<sub>d</sub></b>		Courant diode.
<b>I<sub>pv</sub></b>		Courant photovoltaïque
<b>I<sub>or</sub></b>		Courant court-circuit ;
<b>I<sub>s</sub></b>		courant de sortie en régime établi
<b>V<sub>t</sub></b>	<b>[V]</b>	Tension Thermique
<b>V<sub>d</sub></b>		Tension diode
<b>V<sub>s</sub></b>		Tension de sortie en régime établi
<b>V<sub>e</sub></b>		Tension du convertisseur boost
<b>V<sub>L</sub></b>		Tension pour Q ferme
<b>V<sub>T</sub></b>		Tension pour Q ouvert
<b>V<sub>pv</sub></b>		La tension générer par le module photovoltaïque de Ns cellules en série
<b>V<sub>co</sub></b>		La tension générer par le module photovoltaïque de Np cellules en parallèle



# Liste des figures

## CHAPITRE 1 : Généralités sur production l'énergie du système Photovoltaïque

Figure .1.1 : Les six familles énergies renouvelables .....	5
Figure .1.2 : Principe de l'énergie solaire photovoltaïque. ....	7
Figure .1.3 : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal .....	8
Figure .1.4 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.....	9
Figure .1.5 : Structure basique d'une cellule solaire .....	10
Figure .1.6 : Cellule élémentaire photovoltaïque.....	11
Figure .1.7 : Schéma équivalent d'une cellule idéale. ....	13
Figure 1.8: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	15
Figure 1.9: Association des modules photovoltaïques .....	17
Figure 1.10: Caractéristique $I=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque .....	18
Figure .1.11 : Les différentes zones de Caractéristique $I(V)$ entre générateur et module Photovoltaïque .....	19
Figure 1.12: Caractéristique $P=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque.....	20

## CHAPITRE 2: Les Convertisseurs Statiques de Puissance

Figure 2.1 : Réversibilité et non réversibilité des convertisseurs statiques.....	24
Figure 2.2 : Architecture générique d'un convertisseur statique .....	25
Figure 2.3 : les différents types de convertisseurs statiques .....	26
Figure 2.4: Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	26
Figure 2.5 : Convertisseur DC/DC .....	27
Figure 2.6 : Représentation symbolique et notation Pour le MOSFET et IGBT.....	28
Figure 2.7 : Schéma équivalent d'une inductance réelle L .....	29
Figure 2.8 : Schéma de convertisseur Boost .....	30
Figure 2.9 : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé. ....	31
Figure 2.10 : Circuit équivalent pour $T_{on}$ .....	31
Figure 2.11 : Circuit équivalent pour $T_{off}$ .....	32

Figure 2.12: Forme du courant $i_1$ et $i_2$ .....	33
Figure 2.13 : Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Boost.....	34
Figure 2.14 : Schéma électronique de convertisseur abaisseur Buck.....	35
Figure 2.15: Convertisseur Buck Durant l'état On.....	35
Figure 2.16 : Convertisseur Buck Durant l'état Off.....	36
Figure 2.17 : Caractéristique de la tension et des courants .....	37
Figure 2.18: Variation de la tension de charge avec le courant de charge Pour un convertisseur Buck. 38	38
Figure 2.19 : Schéma de convertisseur inverseur Buck-Boost .....	38
Figure 2. 20: Convertisseur Buck-Boost Durant l'état On .....	39
Figure 2.21: Convertisseur Buck-Boost Durant l'état Off.....	40
Figure 2.22: Schéma d'un hacheur parallèle (boost) raccordé au générateur photovoltaïque. ....	41
Figure 2.23: Couplage de convertisseur avec un récepteur.....	43
Figure 2.24: convertisseur de commutation .....	44
Figure 2 .25 : Chaîne de conversion d'énergie solaire. ....	45
Figure 2.26 : Principe de la commande MPPT .....	46
Figure 2 .27 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température. ....	47
Figure 2.28 : Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O).....	49
Figure 2.329 : Schéma de principe de la conversion Continu – Alternative DC-AC monophasé et triphase. ....	49
Figure 3.30: Architecture possible du système PV avec contrôleur raccordée au réseau (Une réalisation possible de convertisseur de puissance).....	51

### ***CHAPITRE 3: Simulation et Performance d'impact énergie du système***

#### ***Ptf***

Figure 3.1: Système photovoltaïque. ....	53
Figure 3.2 : Modèle de simulation d'une cellule photovoltaïque réelle .....	54
Figure 3.3 : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension Pour différents insolation et une température T=25°C .....	55
Figure 3.4: Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension Pour différents insolation et une température T=25°C .....	55
Figure 3.5 : Ensemble photovoltaïque constitué de six modules PV connectés en série. ....	56

Figure 3.6 : Résultats de simulation des caractéristiques (I-V) des six modules PV connectés en série.....	56
Figure 3.7 : Résultats de simulation des caractéristiques (P-V) des six modules PV connectés en série.....	57
Figure 3.8: Schéma de simulation d'un hacheur DC-DC Boost (step-up) .....	57
Figure 3.9: Résultats de simulation de la tension de sortie Volt En fonction du temps.....	58
Figure 3.10: Résultats de simulation du courant de l'inductance $I_{il}$ En fonction du temps.....	58
Figure 3.11: Résultats de simulation du commutateur de contrôle En fonction de temps .....	58
Figure 3.12: Schéma de simulation d'un Modèle moyenné (averaged) du convertisseur Boost DC-DC avec contrôle de courant d'entrée.....	59
Figure 3.13: Résultats de simulation de la tension de sortie Volt en Fonction du temps.....	60
Figure 3.14: Résultats de simulation de l'Efficacité en fonction du temps.....	60
Figure 3.15: Résultats de simulation de la Duty en fonction du temps.....	60
Figure 3.16: Schéma de simulation d'un Onduleur DC-AC monophasé en mode commuté pour systèmes connectés au réseau. ....	61
Figure 3.17: Résultats de simulation de la tension $V_{ac}$ en fonction du temps.....	61
Figure 3.18: Résultats de simulation du courant $I_{ac}$ en fonction du temps .....	62
Figure 3.19: Résultats de simulation du courant $I$ –Entrée en fonction du temps.....	62
Figure 3.20: Résultats de simulation du commutateur de contrôle en fonction du temps. ....	62
Figure 3.21: Schéma de simulation d'un Onduleur DC-AC monophasé pour les systèmes connectes au réseau.....	63
Figure 3.22: Résultats de simulation de la Duty en fonction du temps .....	63
Figure 3.23: Résultats de simulation du courant d'entrée $I_{in}$ En fonction du temps.....	63
Figure 3.24 : Résultats de simulation de la courant $I_{ac}$ En fonctions du temps.....	64
Figure 3.25 : Résultats de simulation de la tension $V_{ac}$ En fonction du temps. ....	64
Figure 3.26: Résultats de simulation de la Puissance de sortie $P_{out}$ En fonction du temps. ....	64
Figure 3.27: Résultats de simulation de la Puissance de entrée $P_{in}$ En fonction du temps. ....	64
Figure 3.28: Bloc de système PV sons MPPT et convertisseur booste DC-DC et Iref en Simulink ...	66
Figure 3.29 : Bloc de système PV connectée au réseau en Simulink.....	67
Figure 3.30: Résultats de simulation de la puissance .....	69
Sortie et puissance entrée en fonction du temps .....	69
Figure 3.31: Résultats de simulation de la puissance $P_{pv}$ en Fonction de a tension $V$ .....	70
Figure 3.32: Résultats de simulation de la puissance sortie $P_{out}$ en Fonction de la tension $V$ .....	70
Figure 3.33: Résultats de simulation de la efficacité en Fonction du temps.....	70

Figure 3.34: Résultats de simulation de la puissance sortie et puissance entrée en Fonction du temps.....	71
Figure 3.35: Résultats de simulation de la puissance $P_{pv}$ en fonction de la tension V.....	71
Figure 3.36: Résultats de simulation de la puissance sortie $P_{out}$ en fonction de la tension V.....	71
Figure 3.37: Résultats de simulation de la efficacité en fonction du temps.....	72
Figure 3.38: Résultats de simulation des énergies Sortie en fonction du temps.....	73
Figure 3.39: Résultats de simulation des puissances En fonction du temps .....	73

# Liste des figures

## CHAPITRE 1 : Généralités sur la production de l'énergie du système Photovoltaïque

Figure .1.1 : Les six familles énergies renouvelables .....	5
Figure .1.2 : Principe de l'énergie solaire photovoltaïque. ....	7
Figure .1.3 : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal .....	8
Figure .1.4 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.....	9
Figure .1.5 : Structure basique d'une cellule solaire .....	10
Figure .1.6 : Cellule élémentaire photovoltaïque.....	11
Figure .1.7 : Schéma équivalent d'une cellule idéale. ....	13
Figure 1.8: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	15
Figure 1.9: Association des modules photovoltaïques .....	17
Figure 1.10: Caractéristique $I=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque.....	18
Figure .1.11 : Les différentes zones de Caractéristique $I(V)$ entre générateur et module Photovoltaïque .....	19
Figure 1.12: Caractéristique $P=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque.....	20

## CHAPITRE 2: Les Convertisseurs Statiques de Puissance

Figure 2.1 : Réversibilité et non réversibilité des convertisseurs statiques.....	24
Figure 2.2 : Architecture générique d'un convertisseur statique .....	25
Figure 2.3 : les différents types de convertisseurs statiques .....	26
Figure 2.4: Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	26
Figure 2.5 : Convertisseur DC/DC .....	27
Figure 2.6 : Représentation symbolique et notation Pour le MOSFET et IGBT.....	28
Figure 2.7 : Schéma équivalent d'une inductance réelle L .....	29
Figure 2.8 : Schéma de convertisseur Boost .....	30
Figure 2.9 : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé. ....	31
Figure 2.10 : Circuit équivalent pour $T_{on}$ .....	31
Figure 2.11 : Circuit équivalent pour $T_{off}$ .....	32

Figure 2.12: Forme du courant $i_1$ et $i_2$ .....	33
Figure 2.13 : Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Boost.....	34
Figure 2.14 : Schéma électronique de convertisseur abaisseur Buck.....	35
Figure 2.15: Convertisseur Buck Durant l'état On.....	35
Figure 2.16 : Convertisseur Buck Durant l'état Off.....	36
Figure 2.17 : Caractéristique de la tension et des courants .....	37
Figure 2.18: Variation de la tension de charge avec le courant de charge Pour un convertisseur Buck. 38	
Figure 2.19 : Schéma de convertisseur inverseur Buck-Boost .....	38
Figure 2. 20: Convertisseur Buck-Boost Durant l'état On .....	39
Figure 2.21: Convertisseur Buck-Boost Durant l'état Off.....	40
Figure 2.22: Schéma d'un hacheur parallèle (boost) raccordé au générateur photovoltaïque. ....	41
Figure 2.23: Couplage de convertisseur avec un récepteur.....	43
Figure 2.24: convertisseur de commutation .....	44
Figure 2 .25 : Chaîne de conversion d'énergie solaire. ....	45
Figure 2.26 : Principe de la commande MPPT .....	46
Figure 2 .27 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température. ....	47
Figure 2.28 : Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O).....	49
Figure 2.329 : Schéma de principe de la conversion Continu – Alternative DC-AC monophasé et triphase. ....	49
Figure 3.30: Architecture possible du système PV avec contrôleur raccordée au réseau (Une réalisation possible de convertisseur de puissance).....	51

### ***CHAPITRE 3: Simulation et Performance d'impact énergie du système***

#### ***Ptf***

Figure 3.1: Système photovoltaïque. ....	53
Figure 3.2 : Modèle de simulation d'une cellule photovoltaïque réelle .....	54
Figure 3.3 : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension Pour différents insolation et une température T=25°C .....	55
Figure 3.4: Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension Pour différents insolation et une température T=25°C .....	55
Figure 3.5 : Ensemble photovoltaïque constitué de six modules PV connectés en série. ....	56

Figure 3.6 : Résultats de simulation des caractéristiques (I-V) des six modules PV connectés en série.....	56
Figure 3.7 : Résultats de simulation des caractéristiques (P-V) des six modules PV connectés en série.....	57
Figure 3.8: Schéma de simulation d'un hacheur DC-DC Boost (step-up) .....	57
Figure 3.9: Résultats de simulation de la tension de sortie Volt En fonction du temps.....	58
Figure 3.10: Résultats de simulation du courant de l'inductance $I_{iL}$ En fonction du temps.....	58
Figure 3.11: Résultats de simulation du commutateur de contrôle En fonction de temps .....	58
Figure 3.12: Schéma de simulation d'un Modèle moyenné (averaged) du convertisseur Boost DC-DC avec contrôle de courant d'entrée.....	59
Figure 3.13: Résultats de simulation de la tension de sortie Volt en Fonction du temps.....	60
Figure 3.14: Résultats de simulation de l'Efficacité en fonction du temps.....	60
Figure 3.15: Résultats de simulation de la Duty en fonction du temps.....	60
Figure 3.16: Schéma de simulation d'un Onduleur DC-AC monophasé en mode commuté pour systèmes connectés au réseau. ....	61
Figure 3.17: Résultats de simulation de la tension $V_{ac}$ en fonction du temps.....	61
Figure 3.18: Résultats de simulation du courant $I_{ac}$ en fonction du temps .....	62
Figure 3.19: Résultats de simulation du courant $I$ –Entrée en fonction du temps.....	62
Figure 3.20: Résultats de simulation du commutateur de contrôle en fonction du temps. ....	62
Figure 3.21: Schéma de simulation d'un Onduleur DC-AC monophasé pour les systèmes connectes au réseau.....	63
Figure 3.22: Résultats de simulation de la Duty en fonction du temps .....	63
Figure 3.23: Résultats de simulation du courant d'entrée $I_m$ En fonction du temps.....	63
Figure 3.24 : Résultats de simulation de la courant $I_{ac}$ En fonctions du temps.....	64
Figure 3.25 : Résultats de simulation de la tension $V_{ac}$ En fonction du temps. ....	64
Figure 3.26: Résultats de simulation de la Puissance de sortie $P_{out}$ En fonction du temps. ....	64
Figure 3.27: Résultats de simulation de la Puissance de entrée $P_{in}$ En fonction du temps. ....	64
Figure 3.28: Bloc de système PV sons MPPT et convertisseur booste DC-DC et Iref en Simulink ...	66
Figure 3.29 : Bloc de système PV connectée au réseau en Simulink.....	67
Figure 3.30: Résultats de simulation de la puissance .....	69
Sortie et puissance entrée en fonction du temps .....	69
Figure 3.31: Résultats de simulation de la puissance $P_{pv}$ en Fonction de a tension $V$ .....	70
Figure 3.32: Résultats de simulation de la puissance sortie $P_{out}$ en Fonction de la tension $V$ .....	70
Figure 3.33: Résultats de simulation de la efficacité en Fonction du temps.....	70

Figure 3.34: Résultats de simulation de la puissance sortie et puissance entrée en Fonction du temps.....	71
Figure 3.35: Résultats de simulation de la puissance $P_{pv}$ en fonction de la tension V.....	71
Figure 3.36: Résultats de simulation de la puissance sortie $P_{out}$ en fonction de la tension V.....	71
Figure 3.37: Résultats de simulation de la efficacité en fonction du temps.....	72
Figure 3.38: Résultats de simulation des énergies Sortie en fonction du temps.....	73
Figure 3.39: Résultats de simulation des puissances En fonction du temps .....	73



# *Liste des tableaux*

## *CHAPITRE 1 : Généralités sur la production de l'énergie du système Photovoltaïque*

Tableau 1.1:Différent les types des cellules et leurs avantages et inconvénients .....	12
--	----

## *CHAPITRE 2: Les Convertisseurs Statiques de Puissance*

Tableau. 2.1 : Comparaison les principaux convertisseurs DC-DC .....	41
--	----

## *CHAPITRE 3: Simulation et Performance d'impact énergie du système Ptf*

Tableau 3.1 :Valeurs des paramètres de simulation. ....	57
Tableau 3.2 :Valeurs des paramètres de simulation. ....	59
Tableau 3.3 :Valeurs des paramètres de simulation. ....	61
Tableau 3.4 :Valeurs des paramètres de simulation. ....	63
Tableau 3.5 : Calcule des puissances et énergie à sortie de Hacheur et PV de clairment 100 .....	68
Tableau 3.6 : Calcule des puissances et énergie à sortie de Hacheur et PV de clairment 500 .....	68
Tableau 3.7 : Calcule des puissances et énergie à sortie de Hacheur et PV de clairment 1000 .....	69

# *Chapitre 1*

*Généralités sur Production l'énergie  
du Système Photovoltaïque*

## 1. Introduction

La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables, offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule.

Dans ce chapitre, Consiste à la description générale et le principe de fonctionnement des systèmes photovoltaïques , l'énergie solaire ainsi que le fonctionnement physique d'une cellule photovoltaïque.

### 1.1 Production de l'énergie électrique :

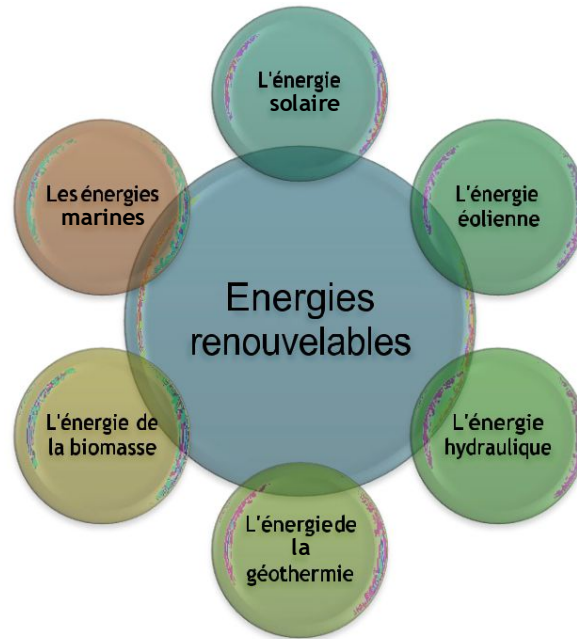
La production de l'énergie électrique consiste en la transformation de l'ensemble des énergies renouvelables en énergie électrique.

#### 1.1.1 Des énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables (ER) utilisent des flux inépuisables d'énergies d'origine naturelle (soleil, vent, eau, croissance végétale...). Ces énergies de l'avenir ne couvrent pourtant que 22% de la consommation mondiale d'électricité avec l'importance de l'hydroélectricité qui représente les trois quarts de l'électricité issue des ER [1].

Les énergies renouvelables proviennent de deux grandes sources naturelles : le Soleil et la Terre. Surnommées "*énergies propres*" ou "*énergies vertes*", leur exploitation engendre très peu de déchets et d'émissions polluantes mais leur pouvoir énergétique est beaucoup plus faible que celui des énergies non renouvelables.

La figure (.1.1), représente les six familles de technologies de production d'électricité:



**Figure .1.1 :** Les six familles énergies renouvelables.

Les différents types d'énergies renouvelables sont divisés en six catégories :

**1- -L'énergie hydraulique :**

L'énergie hydraulique est l'énergie mécanique générée par le mouvement de l'eau : chutes, rivières, marées, courants marins, vagues...

**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 :**

Énergie marine ou d'énergie des mers désigne l'ensemble des énergies renouvelables extraites ou pouvant l'être du milieu marin

**1.1.2 Définition et Historique du photovoltaïque :****a- Définition photovoltaïque :**

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].

Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque.

**b- Histoire photovoltaïque:**

L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français Antoine Becquerel (1788 - 1878) en 1839. Le mot « photovoltaïque » vient du mot « *photo* » (du grec qui signifie « lumière ») et du mot « *Volt* » (nom du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité).

Quelques dates importantes [3-4-10]

- **1954** : Une cellule photovoltaïque pour l'industrie spatiale est mise au point.
- **1958** : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- **1970** : Des applications autonomes terrestre apparaissent (phare, bouée, balise, pompes solaire).
- **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 .

- **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) .

### 1.1.3 Le système photovoltaïque :

Le système photovoltaïque SPV est constitué par une source d'énergie , une interface de puissance (Convertisseurs statiques DC-DC et DC-AC 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 [6].

#### 1.1.3.1 L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique (Figure .1.2 ). Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque [4].

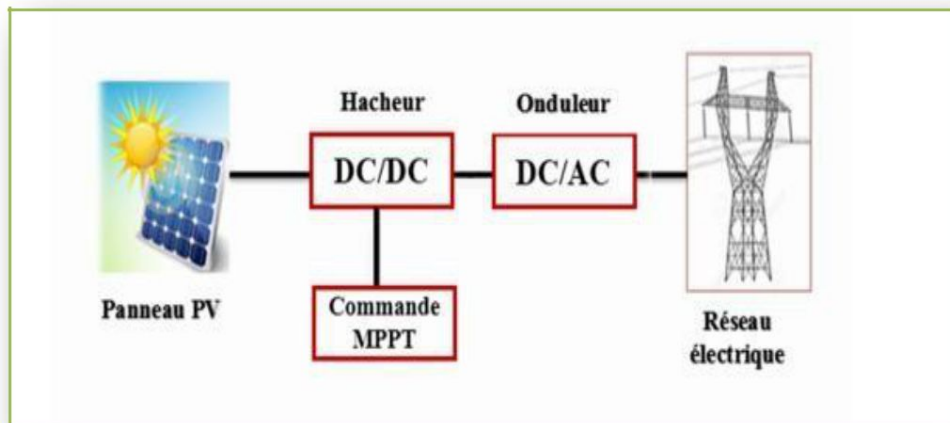


Figure .1.2 : Principe de l'énergie solaire photovoltaïque.

#### 1.1.3.2 Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est un type d'énergie qui peut se propager dans l'espace sous la forme l'ensemble des d'ondes (rayonnement électromagnétique) ou de particules se déplaçant à une grande vitesse (rayonnement corpusculaire) émises par le Sole.

Les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire à l'étude des systèmes photovoltaïques

**a- Différents types de rayonnement :** En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé.

Au sol, on distingue plusieurs composantes [6] :

- **Rayonnement direct :**

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant du disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

- **Rayonnement diffus :**

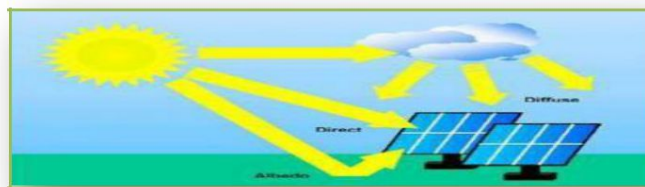
C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère.

- **Rayonnement réfléchi :**

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo ( $\epsilon$ )  $0 \leq \epsilon \leq 1$ .

- **Rayonnement global :**

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi (**Figure .1.3**).



**Figure .1.3 :** Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.

**b- Spectre du rayonnement :**

Le rayonnement électromagnétique (REM) est composé de *grains* lumière appelés les ondes des photons. Ces ondes contiennent de l'énergie électrique et magnétique. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde  $\lambda$  où plus la longueur d'onde courte.

L'énergie du photon est grande comme indique la relation suivante [14]:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Où :  $h$  est la constante de Planck ,  $c$  la vitesse de la lumière et  $\lambda$  : la longueur d'onde Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte value à Albert Einstein le prix Nobel en 1905.

Avec :

- $E (J)$  : Energie en Joule;
- $h (J.s)$  : Constante de Planck ( $h= 6,62607004 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$  ) ;
- $c (ms.^{-1})$  : 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 (1.4), représente la variation de la répartition spectrale énergétique.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement en [2]:

- 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%.

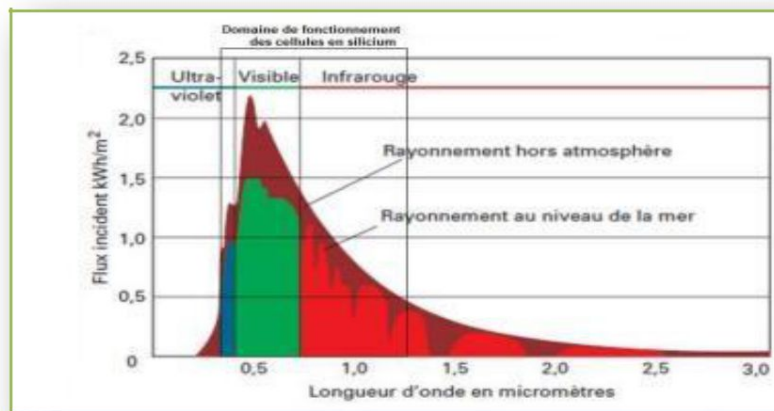


Figure .1.4 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.

## 1.2 Conversion photovoltaïque :

La possibilité de transformer directement l'énergie lumineuse, et en particulier le rayonnement solaire en énergie électrique avec la découverte de l'effet



photovoltaïque. Cet effet utilise les propriétés quantiques de la lumière permettant la transformation de l'énergie incidente en courant électrique dont la cellule solaire, est l'élément de base de cette conversion photovoltaïque [10].

### 1.2.1 L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés "*Semi-Conducteurs : SC*" qui, exposés à la lumière, produisent de l'électricité.

#### 1.2.1.1 Le principe de conversion photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur de la nature du silicium cristallin [10], qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique (Figure .1.5 ) [5].

Les cellules photovoltaïques sont constituées [10]:

- D'une couche fine du semi-conductrice tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antirejet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

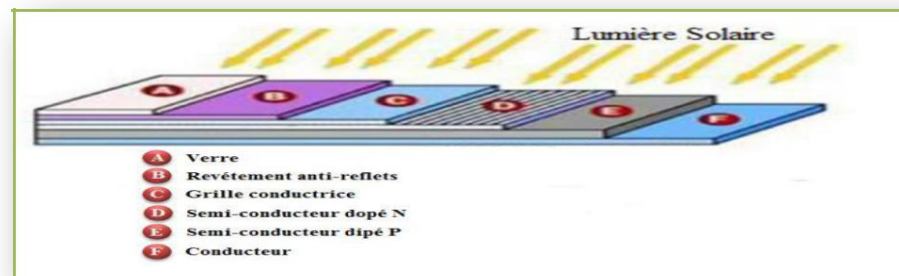


Figure .1.5 : Structure basique d'une cellule solaire .

### 1.2.1.2 Principe de fonctionnement de la cellule PV :

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle composée de matériaux semi-conducteurs est capable de convertir l'énergie de photons reçus a sa surface en une différence de potentiel, créée par une délocalisation d'électrons dans le matériau (Figure .1.6). Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, poly-cristalline ou monocristalline [3].

On appelle cellule solaire un convertisseur qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque [9]

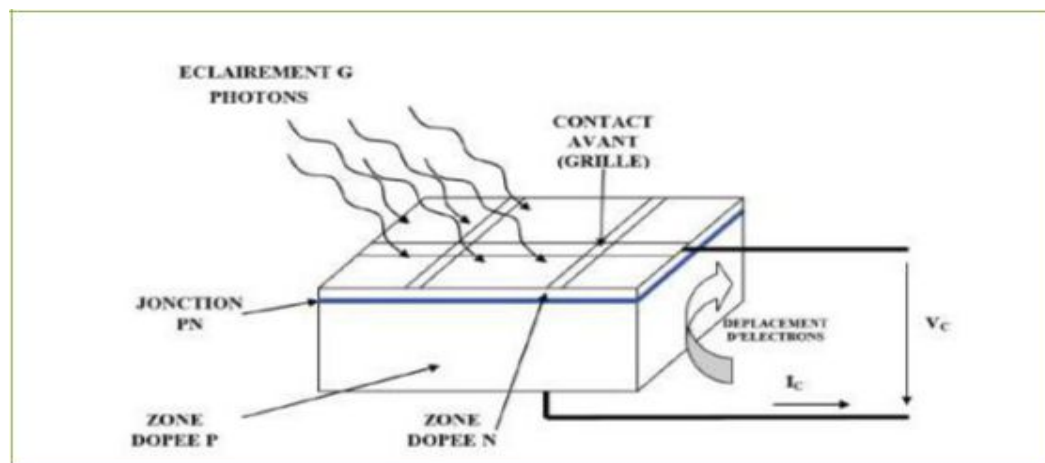



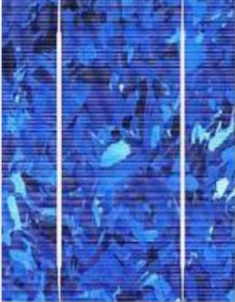

Figure .1.6 : Cellule élémentaire photovoltaïque

La réalisation d'une cellule photovoltaïque est comparable à une diode classique. La cellule est composée de deux différentes couches. La couche supérieure est dopée *N* et la couche inférieure est dopée *P* créant ainsi une jonction *PN*. Cette jonction *PN* crée une barrière de potentiel. Quand la cellule est éclairée, elle produit un courant  $I_{ph}$  approximativement proportionnel à l'ensoleillement. La température est également un facteur influant sur les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque [2].

### 1.2.1.3 Les Différents Types de Cellules Photovoltaïques :

Le tableau (1.1) montre la différence entre les différents types des cellules et leurs avantages et inconvénients [19]:

Tableau 1.1: Différent les types des cellules et leurs avantages et inconvénients

Technologie	Silicium Monocristallines	Silicium Poly-cristallines	Silicium Amorphe
Cellule et Module			
Rendement	14à16%	12à14%	6à8%
Avantages	-Bon rendement -Nombre de fabricants élevé	-Très bon rendement -Moins cher que le monocristallin	-Fonctionnement avec un éclairage faible -Un peu moins chère
Inconvénients	-Cout élevé -Rendement plus faible sous un faible éclairage	-Rendement faible sous faible éclairage	-Rendement faible en plein soleil -Diminution des performances avec le temps

#### 1.2.1.4 Générateur photovoltaïque (GPV) :

Le générateur photovoltaïque est l'élément principal (source) d'un système de production d'énergie photovoltaïque. Un générateur photovoltaïque a un comportement équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Plusieurs modèles mathématiques sont développés pour présenter son comportement non linéaire.

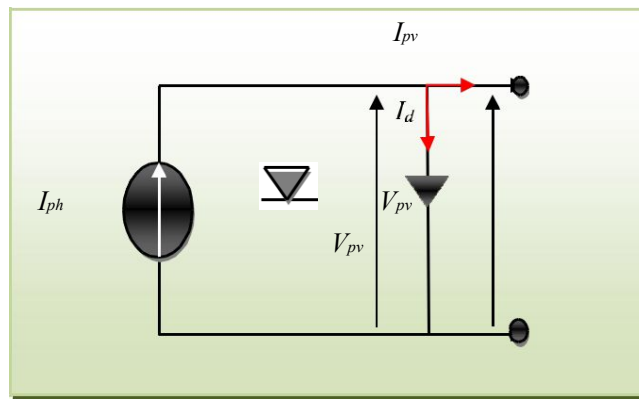
Deux types de regroupement sont à distinguer selon les besoins en courant et en tension de l'application visée. Et les caractéristiques  $I_{pv} = f(V_{pv})$  et  $P_{pv} = f(V_{pv})$  restent identiques à celle d'une cellule PV surtout si le rayonnement est uniforme.

**1.2.1.4.1 Modélisation de la cellule photovoltaïque:**

Il existe plusieurs modèles mathématiques du module photovoltaïque, dans cette section on va présenter quelques-uns.

**a) Modèle idéale d'une cellule photovoltaïque :**

On étudie la cellule photovoltaïque à partir du circuit équivalent donné par la figure composé d'un générateur de courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode délivrant un courant, qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale (Figure .1.7 ) .



**Figure .1.7 :** Schéma équivalent d'une cellule idéale.

Le courant généré par le model est donnée par la loi de Kirchhoff de ce modèle sont:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \tag{1.2}$$

Avec :  $I_{ph}$  : le courant de photo [A].

$I_d$  : le courant traversant la diode[A].

Le courant  $I_{ph}$  est assimilé au courant ( $I_{sc}$ ) avec ( $V_{pv} = 0$ ), courant de court-circuit obtenu en court -circuit à la charge.

$$I_{ph} = I_{sc} \left( \frac{E}{E_{ref}} \right)^{\alpha} \tag{1.3}$$

Ou

$E$  : L'éclairement absorbé par la cellule ;

$E_{ref}$ : L'éclairement de référence ( $1000 \text{ w/m}^2$ ) ;

Le courant de la diode donnée par la formule suivante :

$$I = I_s \left( e^{\frac{V}{n v_t}} - 1 \right) \tag{1.4}$$

La tension thermique ( $v_t$ ) donnée par la formule suivante :

$$v_t = \frac{k T}{q} \tag{1.5}$$

On remplace les équations (1.3) et (1.5) dans l'équation (1.6) on obtient l'équation générale de ce modèle :

$$I = I_s \left( e^{\frac{V}{n \frac{k T}{q}}} - 1 \right) \tag{1.6}$$

Avec

$q$  : la charge de l'électron ( $1.9 \times 10^{-19}$  c)

$k$ : la constante de Boltzmann=  $1,38064852 \times 10^{-23}$  J/K

$n$  : facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

$v_t$  : la tension thermique.

$I_s$  : le courant de saturation inverse de la diode.

$V$  : la tension à la borne de la diode.

$T$  : la température absolue (en kelvin).

$I_{ph}$  : le photo-courant.

$I_d$  : la caractéristique de la diode I (V).

**b) Modèle réelle d'une cellule photovoltaïque :**

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure 2.8 .

Le modèle mathématique du générateur photovoltaïque est basé sur le circuit équivalent est constitué d'une diode ( $d$ ) caractérisant la jonction, une source de courant ( $I_{ph}$ ) caractérisant le photo-courant, une résistance série ( $R_s$ ) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte ( $R_{sh}$ ) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à ( $R_s$ ) .

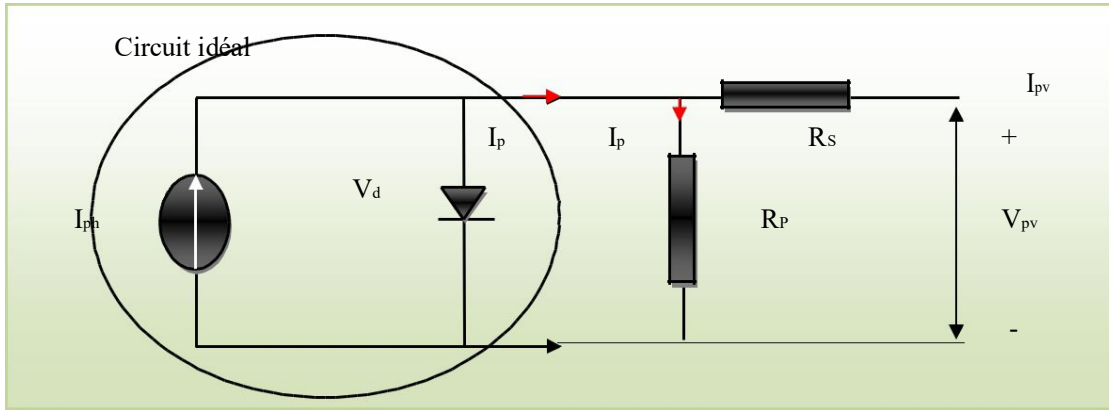


Figure 1.8: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

Le courant généré par la cellule photovoltaïque est donnée par la loi de Kirchhoff sont:

$$I_{ph} - I_d - I_p = 0 \quad (1.7)$$

Ou :

$I_{ph}$  : le courant de photo [A].

$I_d$  : le courant traversant la diode [A].

$I_p$ : Le courant circulant dans la résistance  $R_p$  ;

Le courant de la diode donnée par la formule suivante :

$$I_d = I_{sref} \left( e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) \quad (1.8)$$

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression :

$$I_{sref} = A_0 \exp\left(-\frac{E_g}{kT_n}\right) \quad (1.9)$$

Ou

$I_{sref}$ : le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence  $T_n$  et l'éclairement de référence ;

$T$  : Température de la jonction des cellules PV [°K] ;

$T_n$  : Température de référence des cellules PV [°K] ;

$q$  : la charge de l'électron ( $1.9 \times 10^{-19}$  c)

$k$ : la constante de Boltzmann=  $1,38064852 \times 10^{-23}$  J/K

$n$  : facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

$E_g$  : Énergie de gap de la cellule PV [ev] ;

La tension de la diode donnée par la formule suivante :

$$= + \tag{1.10}$$

On remplace les équations (1.10) et (1.8) dans l'équation (1.7) on obtient l'équation de courant  $I_{pv}$  de ce modèle :

$$= - \frac{+}{-1 - \frac{+}{(+)}}$$
(1.11)

$$= - \frac{+}{-} - \frac{+}{-1}$$
(1.12)

Ou

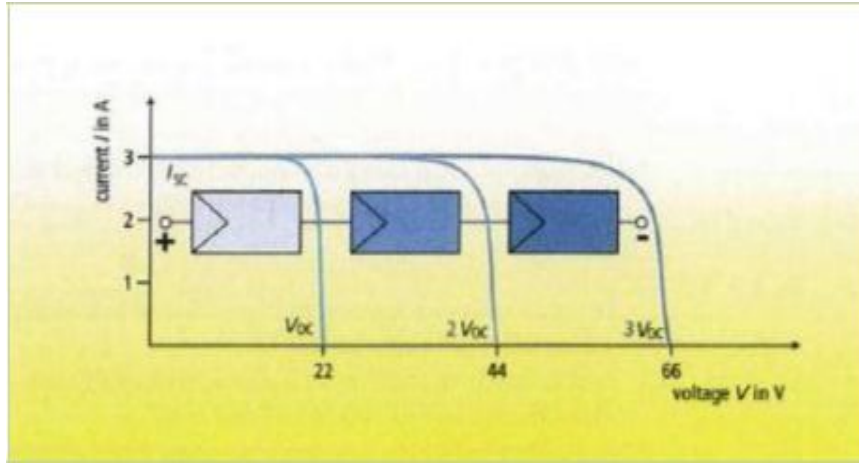
$V_{pv}$  : La tension de sortie ;

$R_s$  : résistance série [ $\Omega$ ]

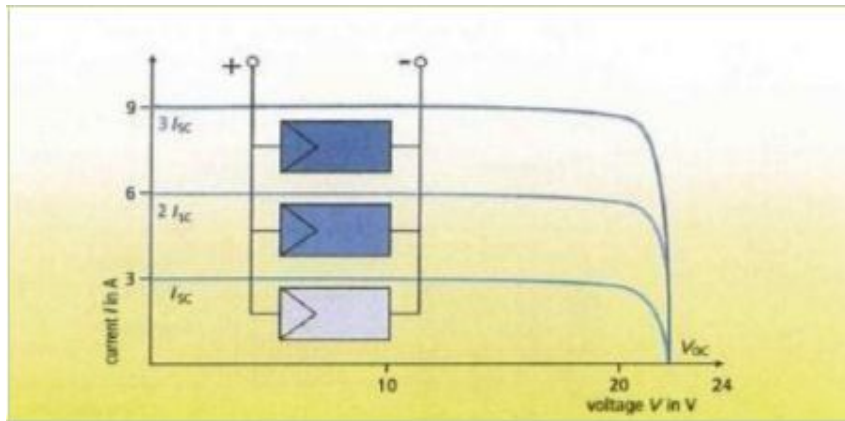
$R_p$  : résistance parallèle [ $\Omega$ ].

### 1.3 Association en série et parallèle d'un module photovoltaïque :

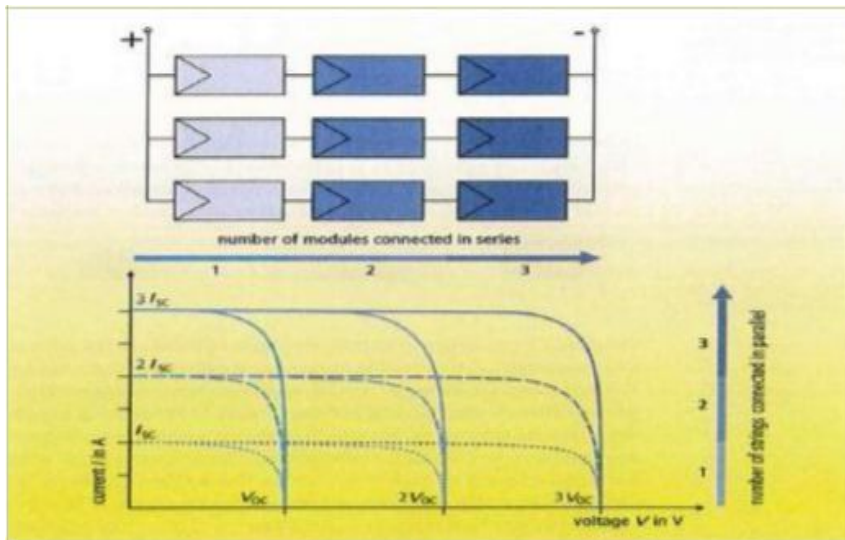
Un module des cellules connecté en parallèle est suffisant pour augmenter le courant du générateur en, associe "Np" modules en parallèle comme montrer dans les figures (1.9-b) et (1.9-a). pour obtenir une augmentation de la tension du générateur en, associe "Ns" modules en série comme Le montrent les figures précédentes. Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque Figure (1.9-c). [21-22]



a) Association en série



b)-Association en parallèle



c) Association mixte (Série + Parallèle) Figure

1.9: Association des modules photovoltaïques .



Le courant-tension de ( $N_s$ ) cellule série et parallèle sont :

- Le courant-tension de ( $N_s$ ) cellule série :

$$I = I_{sc} - I_0 \left( e^{\frac{U}{nV_T}} - 1 \right) \tag{1.13}$$

Avec :

$U$  : La tension générée par le module photovoltaïque de  $N_s$  cellules en série.

$I$  : Le courant aux bornes du module photovoltaïque de  $N_s$  cellules en série.

L'équation (1.3) résume la caractéristique électrique d'une association série de ( $N_s$ ) cellules [21].

- Le courant-tension de ( $N_p$ ) cellule parallèle et:

$$I = N_p I_{sc} - I_0 \left( e^{\frac{U}{nV_T}} - 1 \right) \tag{1.14}$$

$$I = N_p I_{sc} - I_0 \left( e^{\frac{U}{nV_T}} - 1 \right) \tag{1.15}$$

Avec :  $U$  : La tension générée par le module photovoltaïque de  $N_p$  cellules en parallèle.  
 $I$  : Le courant aux bornes du module photovoltaïque de  $N_p$  cellules en parallèle.

## 1.4 Caractéristiques électriques d'une cellule :

### 1.4.1 Caractéristiques courant / tension :

La caractéristique courant / tension d'une cellule a l'allure suivante la figure (1.10) [23] :

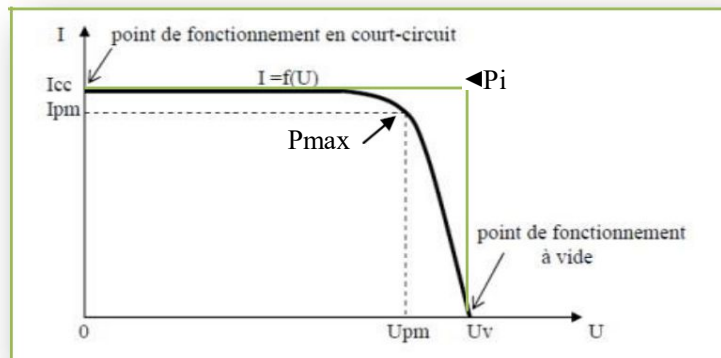


Figure 1.10: Caractéristique  $I=f(U)$  d'une cellule photovoltaïque .

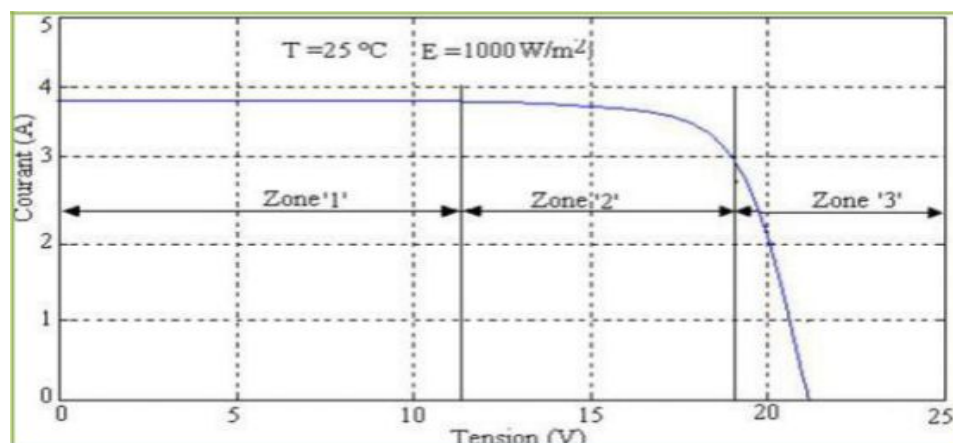
Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc.), le courant électrique disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque figure (1.10). Le caractéristique  $I=f(U)$  d'une cellule photovoltaïque, sur cette courbe, on repère :

- Le point de fonctionnement à vide ou de circuit ouvert ( $U_{co}= U_v$ ) :  $U_v$  pour  $I = 0 A$
- Le point de fonctionnement en court-circuit :  $I_{cc}$  pour  $U = 0V$

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairage et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe  $I = f(V)$  est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque

La figure (1.11) représente trois zones essentielles [7],[11] :

1. **La zone (1)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, Le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
2. **La zone (2)** : correspondant au code de la caractéristique, la région intermédiaire Entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du Générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
3. **La zone (3)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une Tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.



**Figure .1.11** : Les différentes zones de Caractéristique  $I(V)$  entre générateur et module Photovoltaïque .

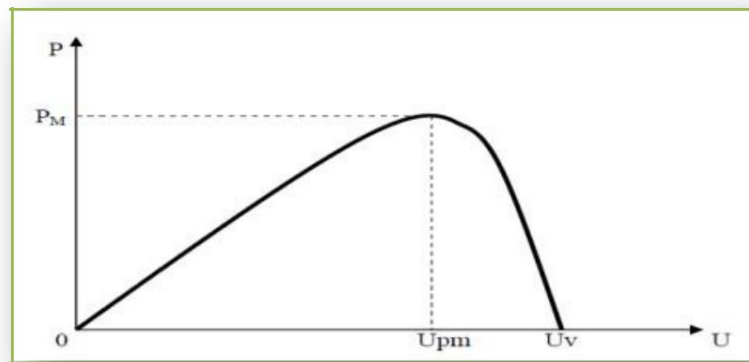
## 2. Caractéristiques puissance / tension :

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc.), la puissance électrique  $P$  disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque (figure 1.12) est égale au produit du courant continu fourni  $I$  par une tension continue donnée  $V$  et donnée par l'expression suivant :

$$P = U.I. \quad (1.16)$$

Où  $P$  : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV.  $V$ : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV et  $I$  : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV

Pour chaque point de la courbe précédente, on peut calculer la puissance  $P$  et tracer la courbe  $P = f(U)$ . Cette courbe a l'allure suivante[23] :



**Figure 1.12:** Caractéristique  $P=f(U)$  d'une cellule photovoltaïque.

La figure (1.12), représente le caractéristique  $P=f(U)$  d'une cellule photovoltaïque, sur cette courbe passe par un maximum de puissance ( $P_m$ ). A cette puissance correspond, une tension  $U_{pm}$  et un courant  $I_{pm}$  que l'on peut aussi repérer sur la courbe  $I = f(U)$ .

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum idéale  $P_i$  correspondrait donc à la tension de circuit ouvert ( $U_{co}= U_v$ ) multipliée par le courant de court-circuit  $I_{cc}$  (figure 1.10):

$$P = P_{max\ ideal} = U_{co} \cdot I_{cc} \quad (1.17)$$

Un générateur photovoltaïque (GPV) élémentaire peut être un seul panneau décrit par les paramètres suivants [24]:

- **La puissance de crête  $P_c$**  : puissance nominale délivrée par le module dans les conditions standards ( $25\text{ }^\circ\text{C}$  et un éclairement de  $1000\text{ W/m}^2$ ). Elle s'exprime en Watt crête ( $W_c$ ).
- **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  $V_{co}$**  : tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement « plein soleil ».
- **Le courant de court-circuit  $I_{sc}$**  : courant débit par un module en court-circuit pour un éclairement « plein soleil ».
- **Le point de fonctionnement optimum (Point De Puissance Maximale ou MPPT)** : 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 :

$$P_{c} = V_{co} \cdot I_{sc} \tag{1.18}$$

- **Le rendement** : Ce le 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 et (G) l'éclairement, ce rendement a pour expression :

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{G \cdot S} \tag{1.19}$$

- **Le facteur de forme (ou FF)** : rapport entre la puissance optimale  $P_{mpp}$  et la puissance maximale que peut avoir le module.

$$FF = \frac{P_{mpp}}{V_{co} \cdot I_{sc}} \tag{1.20}$$

## 1.5 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 :

### 1- Avantages du photovoltaïque :

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

- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque 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 [9].
- Le coût de fonctionnement est faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, 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 [9].

### 2- Inconvénients du photovoltaïque :

Les Inconvénients qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque qui peuvent être résumés comme suit :

- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- 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 [29].
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée [9].
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis [9].

## **1.6 Conclusion :**

Dans Ce premier chapitre s'est consacré à présenter les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un L'énergie photovoltaïque est une énergie renouvelable qui provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein des matériaux bien particuliers tels que les semi-conducteurs (le silicium, le Germanium, l'Arséniure des Galium,...).. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres et leurs fonctionnement et une spécification des différentes zones de fonctionnement et les avantages et inconvénients de l'énergie .

Dans le chapitre suivant, on présentera une étude sur les convertisseurs statistique d'électronique de puissance .

# *Chapitre 2*

*Les Convertisseurs  
Statiques de Puissance*

## 2. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier les convertisseurs (DC-DC) et (DC-AC). Nous y présentons d'abord le principe et fonctionnement des types convertisseurs statiques électriques continu-continu (DC-DC) et continu-alternatif (DC-AC). Ensuite, On va décrire un nombre important de technique de la commande MPPT du convertisseur DC-DC.

### 2.2 Les convertisseurs statiques

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 [33].

**On distingue deux types de sources de tension :**

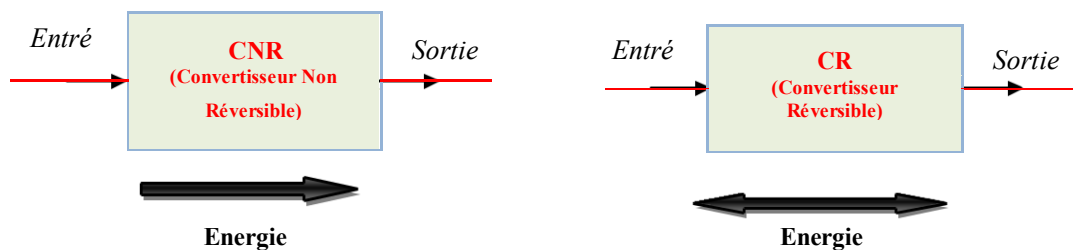
- 1- Sources de tension continues caractérisées par la valeur  $V$  de la tension.
- 2- Sources de tension alternatives définies par les valeurs  $V$  de la tension efficace et les valeurs  $f$  de la fréquence.

#### 2.2.1 Fonctions de base et terminologie des convertisseurs statiques

L'énergie électrique est disponible soit sous forme alternative (réseau de distribution électrique, alternateurs) soit sous forme continue (batterie d'accumulateurs, génératrice à courant continu, cellules photovoltaïques, pile à combustible, ...). La charge peut nécessiter une alimentation en alternatif ou en continu.

- **Types des convertisseurs statiques:** Il existe deux types des convertisseurs statiques sont réversible et non réversible [34] :

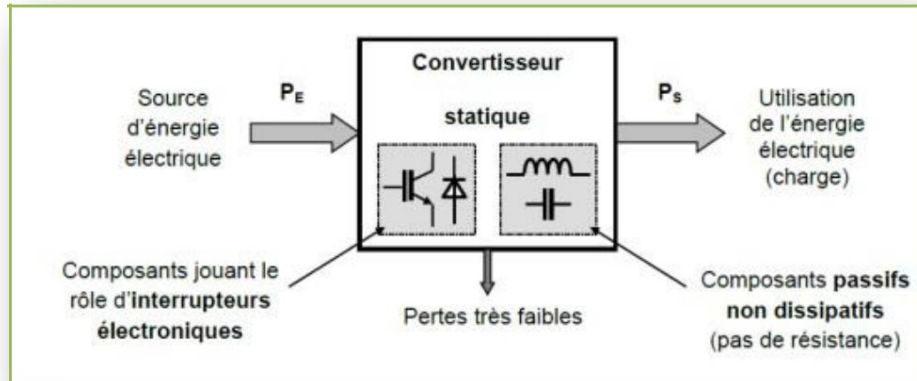
- a) **Un convertisseur statique est dit réversible(CR)** lorsque l'énergie, peut transiter (en général, être contrôlée) de manière bidirectionnelle, c'est à dire aussi bien dans un sens que dans l'autre.
- b) **Un convertisseur non réversible(CNR)** transfère l'énergie d'une source vers une charge utilisatrice.



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



Les convertisseurs statiques utilisent des composants jouant le rôle d'interrupteurs électroniques (Ouverts ou Fermés) selon un principe de découpage complété par des circuits passifs de filtrage [35].



**Figure 2.2 :** Architecture générale d'un convertisseur statique .

### 2.2.2 Modélisation des Convertisseurs

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ photovoltaïque et la charge pour une charge continu (sans stockage avec une charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu), soit entre la batterie et la charge (après stockage, il sera appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif) [36].

Les convertisseurs statiques sont des circuits électriques utilisant des semi-conducteurs de puissance (diodes, thyristors, transistors ...) utilisés comme des interrupteurs, dans le but de transformer le spectre du signal (amplitudes, fréquences, phases) pour adapter la source à la charge.

- **Les fonctions des convertisseurs statiques:**

Le convertisseur statique remplit les fonctions suivantes :

- Conversion de courant continu en courant alternatif compatible avec la tension du réseau.
- Optimisation de la tension continue de manière à ce que le champ de modules fonctionne dans des conditions de puissance optimales.
- Sécurité.

### 2.2.3 Les différents convertisseurs

Dans le domaine de l'électronique de puissance, il existe plusieurs types de convertisseurs, selon le besoin d'utilisation, parmi cela on trouve [37-38] :

- 1- Les convertisseurs Alternatif/Alternatif (AC => AC), exemple : **Gradateur**.
- 2- Les convertisseurs Continue/Continue (DC => DC), exemple : **Hacheur**.
- 3- Les convertisseurs Continue/Alternatif (DC => AC), exemple: **Onduleur**.
- 4- Les convertisseurs Continu/Alternatif (AC => DC), exemple : **Redresseur**.

La figure ( 2.3 ), représente les différents types de convertisseurs statiques dans le domaine d'électronique de puissance [37].

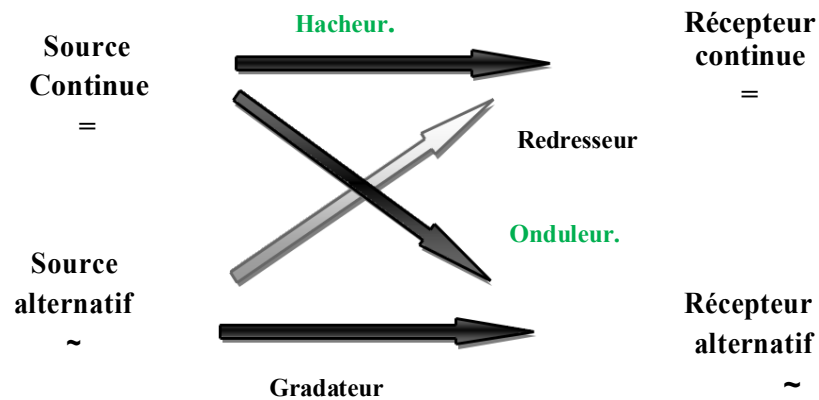


Figure 2.3 : les différents types de convertisseurs statiques .

#### 2.2.3.1 Convertisseurs continus-continus (DC/DC) ou Les Hacheurs :

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau photovoltaïque PV) à la charge qui demande en général une tension du DC constante.

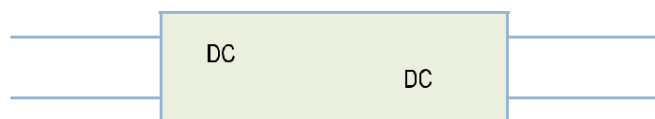


Figure 2.4: Symbole d'un convertisseur DC-DC.

Dans l'étude des convertisseurs DC-DC, nous distinguerons systématiquement l'alimentation (Source génératrice d'énergie) de la charge du convertisseur (source réceptrice).

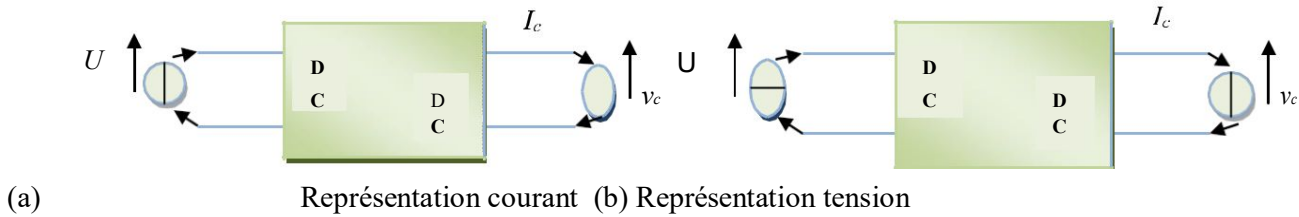


Figure 2.5 : Convertisseur DC/DC

Les différents types des convertisseurs hacheurs :

- **Hacheur dévolteur (Buck ou série) :** la tension moyenne délivrée en sortie est inférieure à celle appliquée en entrée.
- **Hacheur survolteur (Boost ou parallèle) :** la tension moyenne délivrée en sortie est supérieure à celle appliquée en entrée.
- **Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost ou série-parallèle) :** ce sont des hacheurs capables de fonctionner de deux manières (Buck –Boost) ou la tension moyenne de sortie est inférieure ou supérieure à celle de l'entrée.

Dans notre étude, le convertisseur Boost est utilisé comme adaptateur de la charge, permettant la du point de puissance maximale [39-40].

### 2.2.3.2 Composition du convertisseur [41]

#### a) Le transistor

**Définition :** Un transistor est un interrupteur commandé à deux segments de même signe.

**Exemples :** On retrouve plusieurs technologies des transistors sont

- Le transistor MOSFET (Metal Oxyde Semi-conducteur Field Effet Transistor), enrichi à grille isolée est utilisé en électronique de puissance pour alimenter des charges en commutation [37-38] et
- Le transistor IGBT bipolaire à grille isolée (Insulated Gate Bipolar transistor).

Ce sont tous deux des composants unidirectionnels en tension et en courant [37].

La figure (2.6) , repente type de transistor est caractérisé par la charge de ses porteurs majoritaires qui détermine s'il est de type P ou N.

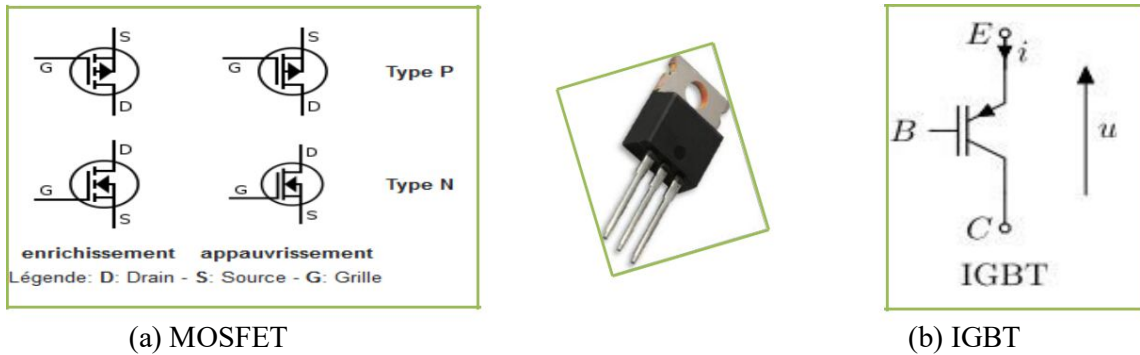


Figure 2.6 : Représentation symbolique et notation Pour le MOSFET et IGBT

**b) Le condensateur**

**Définition :** Le condensateur est un composant électronique élémentaire, constitué de deux armatures conductrices appelées « électrodes » en influence totale et séparées par un isolant polarisable (ou « diélectrique »). La capacité d'un condensateur est égale au rapport de la charge électrique  $Q$  emmagasinée à la tension  $V$  appliquée entre ses armatures [37].

$$C = \frac{Q}{U} \tag{2.12}$$

Dans le cas simplifié d'un condensateur dont la surface  $S$  des armatures en regard est plane, l'expression de la capacité est [41]:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{e} \tag{2.13}$$

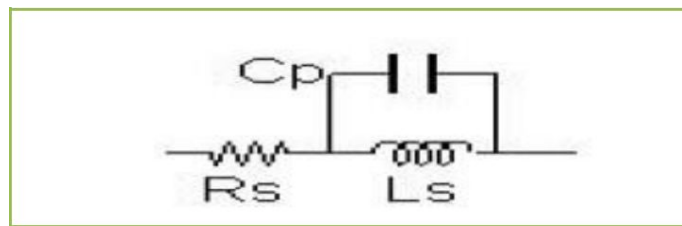
Avec :

- $\epsilon_0$  : Permittivité du vide.
- $\epsilon_r$  : Permittivité relative (2 à 20000) du diélectrique.
- $e$  : Epaisseur du diélectrique .

**c) L'inductance [10]**

**Définition :** L'inductance est un composant électronique **élémentaire**, joue un rôle pour stocker une énergie électrique sous forme magnétique, puis de la restituer. On peut naturellement réaliser des bobinages à air.

Le schéma électrique équivalent d'une inductance réelle  $L$  est le suivant :



**Figure 2.7** : Schéma équivalent d'une inductance réelle  $L$

Où  $R_s$  représente la résistance série du fil bobiné et  $C_p$  les capacités parasites inter spires.

La valeur de l'inductance est obtenue par [40]:

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 S}{l} \quad (2.14)$$

Avec :

$\mu_0$  : constants  $4 \pi \cdot 10^{-7}$  (SI)

$\mu_r$  : Perméabilité relative ( $\mu$  compris entre fer éventuel)

$S$  : Section effective magnétique du noyau (section moyenne)

$l$  : Longueur magnétique effective (longueur moyenne du circuit magnétique).

$N$  : Nombre de spires.

#### d) La diode Schottky

La diode Schottky présente deux avantages par rapport aux diodes classiques [10], [14] :

- Caractéristique électrique : tension de blocage de 600 V.
- Tension de seuil plus faible ( $V_s = 0,3V$ ).
- Les diodes Schottky ont des temps de recouvrement inverse très courts ( $T_r$  de 0,15 à 0.35 $\mu s$ ).

Les diodes Schottky sont utilisées en basse tension dans les circuits nécessitant une grande vitesse de commutation, par exemple dans les montages hacheurs à haute fréquence que l'on rencontre dans les alimentations à découpage [39].

### 2.2.3.3 Convertisseur Boost

Un convertisseur 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 [40]. 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 [38].

#### a) Schéma du convertisseur Boost

Le convertisseur Boost 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.

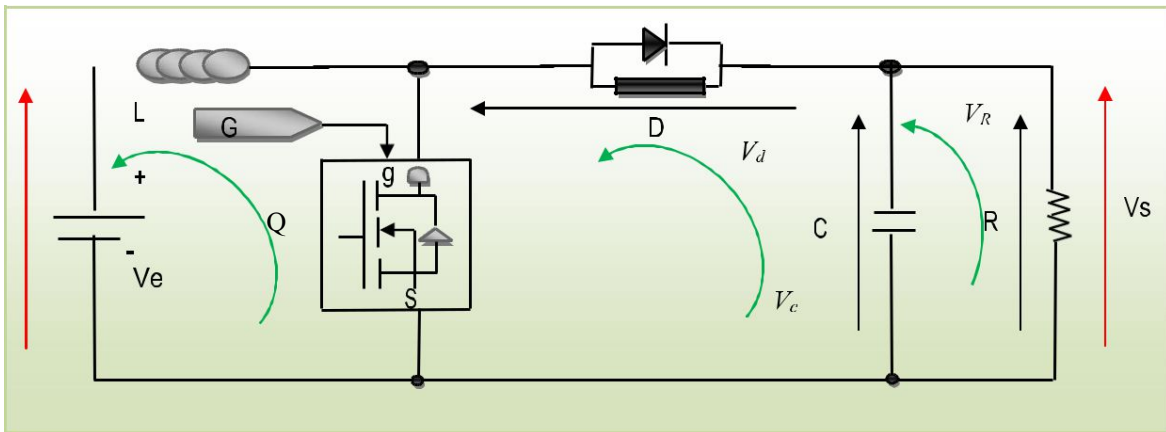


Figure 2.8 : Schéma de convertisseur Boost.

#### b) Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux modes sont :

- **Mode continu** : (Une phase d'accumulation d'énergie) :

Lorsque de l'état passant du l'interrupteur Q est fermé ( $Q=1$ ) : La diode  $D$  est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

- **Mode discontinu** :

Lorsque l'interrupteur Q est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.é.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant

traversant l'inductance traverse ensuite la diode, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité [42].

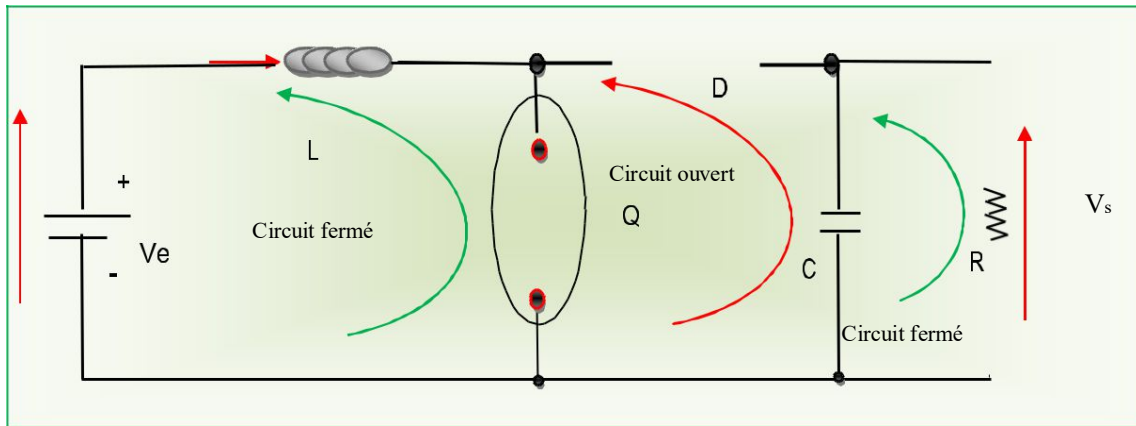


Figure 2.9 : Schéma électrique d'un hacheur Boost fermé.

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

**A) 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.

La figure (2.10) représente formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Boost.

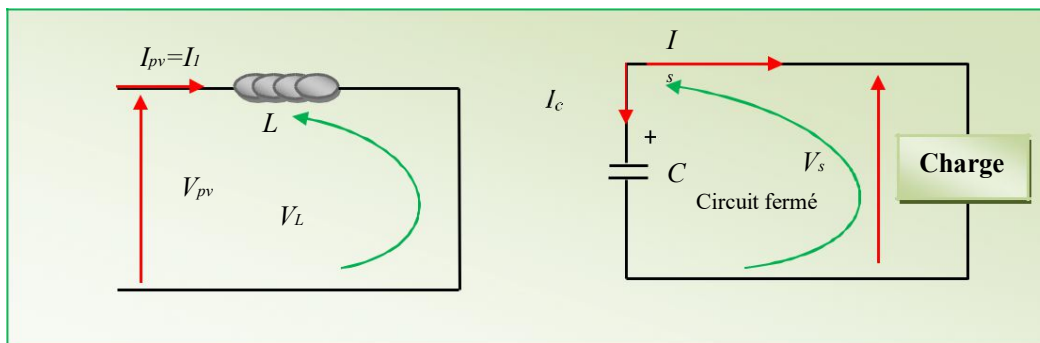


Figure 2.10 : Circuit équivalent pour  $T_{on}$ .

**a.1) L'équation de la tension :** Durant l'état passant, l'interrupteur  $Q$  est fermé, entraînant l'augmentation du courant suivant la relation :

$$= - \tag{2.15}$$

Avec :  $= \tag{2.16}$

a.2) **L'équation du courant** : à la fin de l'état passant, le courant  $i_{1L}$  a augmenté selon l'équation (2.17):

$$i_{1L} = \dots \quad (2.17)$$

$$i_{1L} = \dots \quad (2.18)$$

Où  $i_{1L}$  est le courant à l'instant initial.

**B) 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.

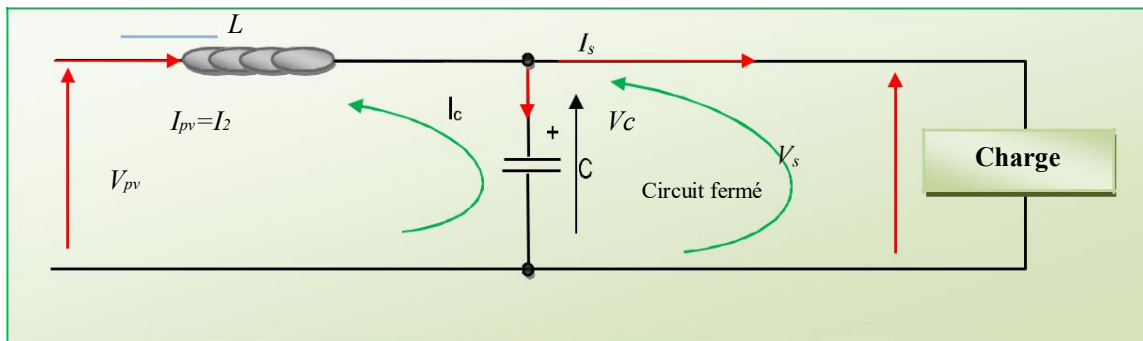


Figure 2.11 : Circuit équivalent pour  $T_{off}$ .

b.1) **L'équation de la tension** : Pendant l'état bloqué, l'interrupteur Q est ouvert, le courant traversant l'inductance circule à travers la charge.

$$- = - \quad (2.19)$$

b.1) **L'équation du courant** : à la fin de l'état passant, le courant  $i_{2L}$  a augmenté selon l'équation (2.20):

$$i_{2L} = \dots \quad (2.20)$$

$$i_{2L} = \dots \quad (2.21)$$

Où  $i_{2L}$  est le courant à l'instant initial.

La figure (2.12) , représente forme du courant  $i_1$  et  $i_2$ :



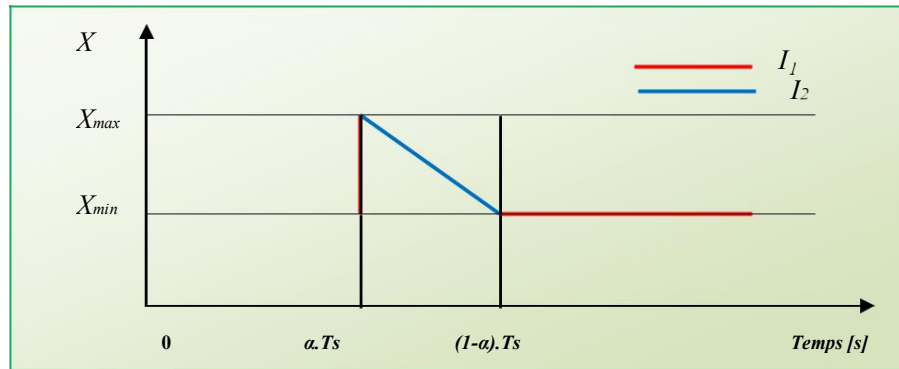


Figure 2.12: Forme du courant  $i_1$  et  $i_2$

L'énergie stockée dans l'inductance est donnée par :

$$= \frac{1}{2} L i^2 \tag{2.22}$$

La variation du courant traversant l'inductance est :

$$\Delta i = 0 \tag{2.23}$$

En remplaçant  $i_{on}$  et  $i_{off}$  par leurs expressions, on obtient :

$$i_{on} + (-1) i_{off} = 0 \tag{2.24}$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$i_{on} = (-1) i_{off} \tag{2.25}$$

Le rapport cyclique est [43]. :

$$D = \frac{t_{on}}{T} \tag{2.26}$$

La tension et courant de sortie en régime établi selon :

$$V_o = \frac{V_i}{(-1)} \text{ Avec } \alpha > 1 \tag{2.27}$$

$$\tag{2.28}$$

Grâce à l'expression (2.28) on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée et le rapport cyclique variant entre (0 et 1), et que théoriquement elle peut être infinie lorsque  $\alpha$  se rapproche de 1. C'est pour cela que l'on parle de survolteur [44].

Pour la fréquence de découpage  $f$ , on en déduit l'ondulation de courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta i_L = \frac{V_{in}}{L} \frac{1}{2} \left( \frac{1}{f} \right)^2 \quad (2.29)$$

$$\Delta V_o = \frac{V_o}{2} \frac{1}{f} \left( \frac{1}{L} \right) \quad (2.30)$$

Le courant dans l'inductance est fonction de la puissance débitée par la source. On peut exprimer sa valeur moyenne en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique :

$$I_L = \frac{I_o}{1 - \alpha} \quad \text{Avec } \alpha > 1 \quad (2.31)$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes. En tension, on a :

$$V_{Q,D} = V_o \left( \frac{1}{1 - \alpha} \right) \quad (2.32)$$

Et en courant :

$$I_{Q,D} = I_o \left( \frac{1}{1 - \alpha} \right) \quad (2.33)$$

Les caractéristiques de tension et du courant du convertisseur Boost sont décrites par la figure suivante [40]:

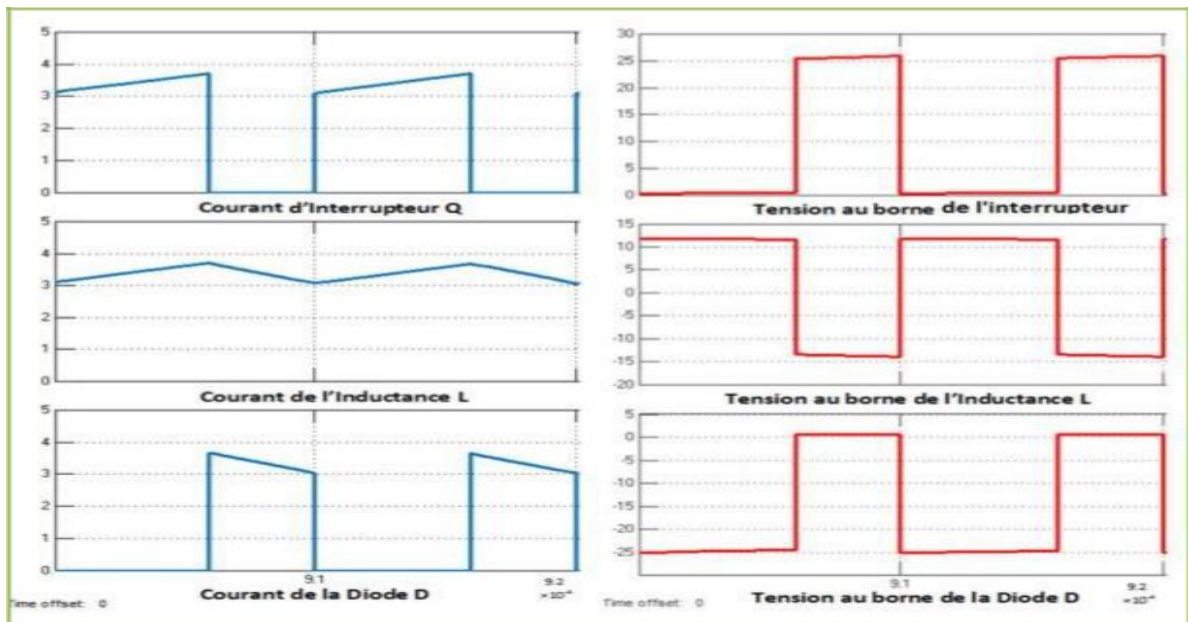


Figure 2.13 : Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Boost .

### 2.2.3.4 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 2.18. Il présente les mêmes composants clés que pour le convertisseur Boost.

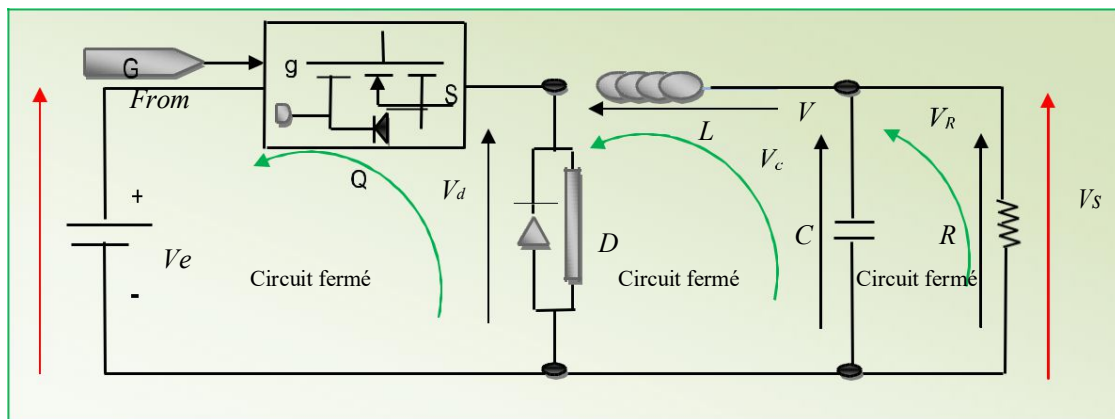


Figure 2.14 : Schéma électronique de convertisseur abaisseur Buck.

#### b) Principe de fonctionnement

Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à gauche du PPM. Alors, pour les deux modes de fonctionnement on a :

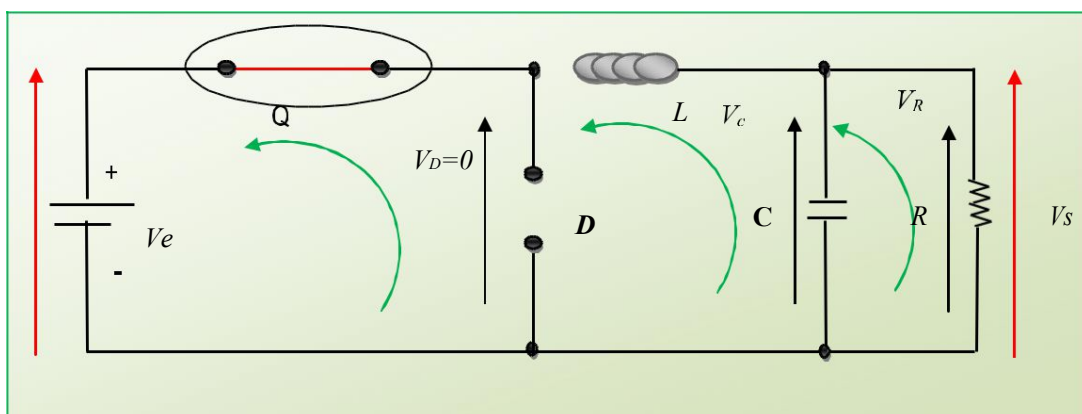


Figure 2.15: Convertisseur Buck Durant l'état On.

**A) Pour  $T_{on}$  (Q fermé) :**

**a.1) L'équation de la Tension :**

Pour Q fermé, on a les équations des tensions et :

$$= 0 \text{ Et } = - \tag{2.34}$$

Alors la tension aux bornes de l'inductance sera :

$$= - = - > 0 \tag{2.35}$$

**a.2) L'équation du courant :** A partir de l'intégration de l'équation (2.35), on peut faire sortir

L'équation du courant  $i_L$  qui sera :

$$= - + \tag{2.36}$$

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

**B) Pour  $T_{off}$  (Q ouvert) :** Si Q est désactivé après  $= 1$ , 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. Cette dernière permet d'évacuer l'énergie emmagasinée dans l'inductance à l'ouverture du commutateur sans créer de surtension.

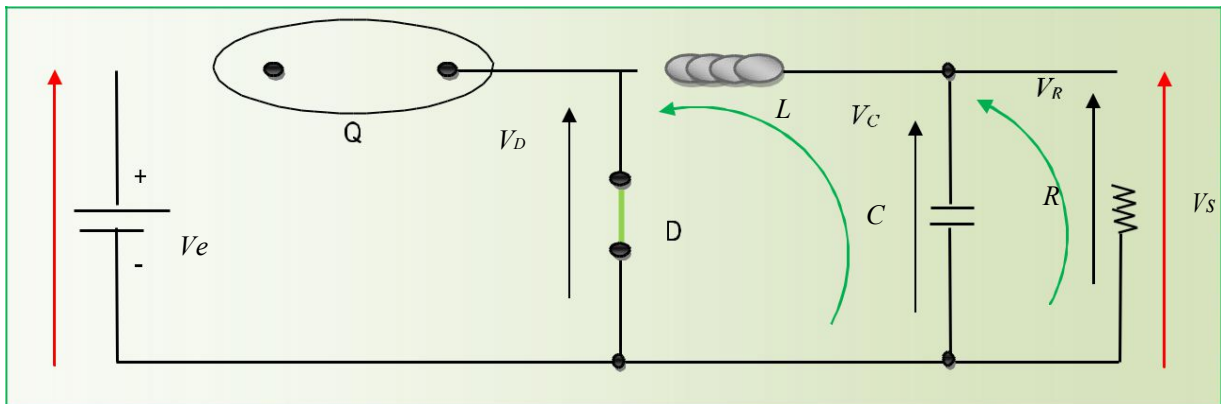


Figure 2.16 : Convertisseur Buck Durant l'état Off.

**b.1) L'équation de la Tension :**

Pour Q ouvert, les équations des tensions sont :

$$= \quad \text{Et} \quad = 0 \tag{2.37}$$

Alors la tension sera

$$= - \quad = \leq 0 \tag{2.38}$$

**b.2) L'équation du courant :**

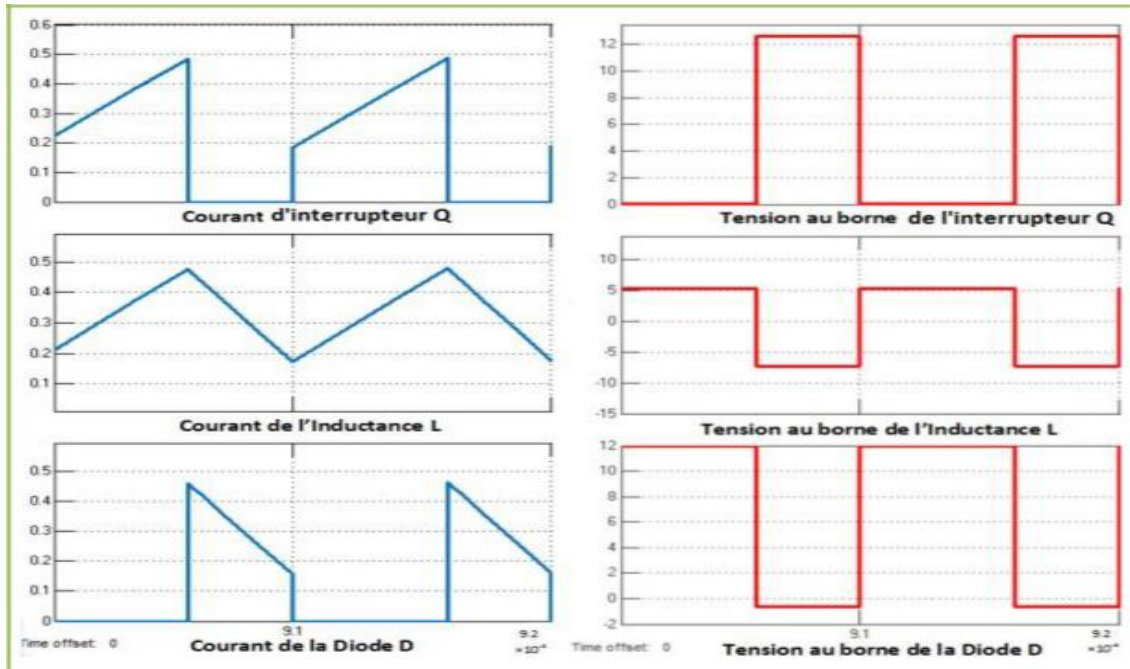
Pour Q ouvert, l'équations de courant  $i_L$  sont :

$$= - + \tag{2.39}$$

La tension aux bornes de la charge est donnée par :

$$= - = \tag{2.40}$$

Les caractéristiques de tension et du courant du convertisseur Buck sont décrites par la figure(2.17) suivante [40]:



**Figure 2.17 :** Caractéristique de la tension et des courants dans le transistor et l'inductance d'un convertisseur Buck .

### 2.2.3.5 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

Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation.

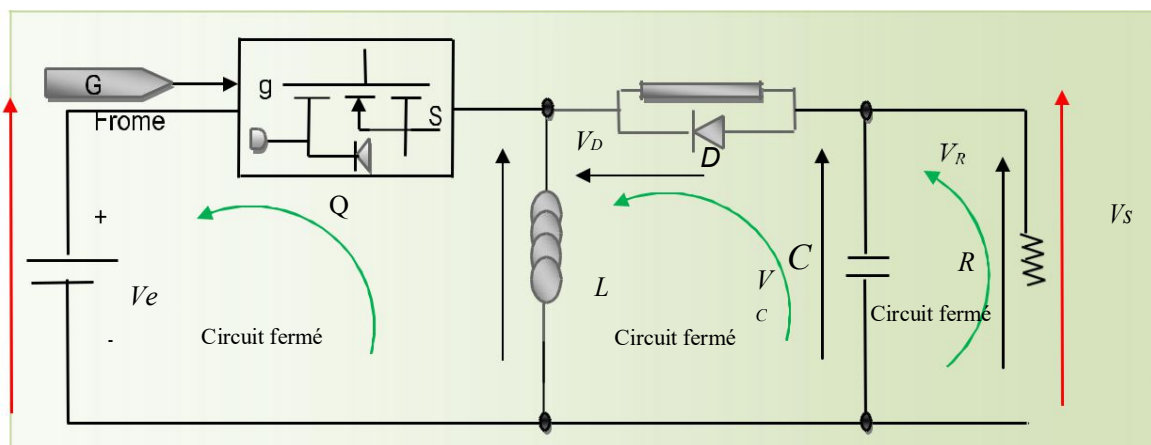


Figure 2.18 : Schéma de convertisseur inverseur Buck-Boost.

#### b) Principe de fonctionnement

Durant l'état On, l'énergie apportée par la source (GPV) est stockée dans l'inductance. L'énergie stockée dans l'inductance  $L$  est livrée ensuite à la charge pendant l'état Off.

##### A) 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.

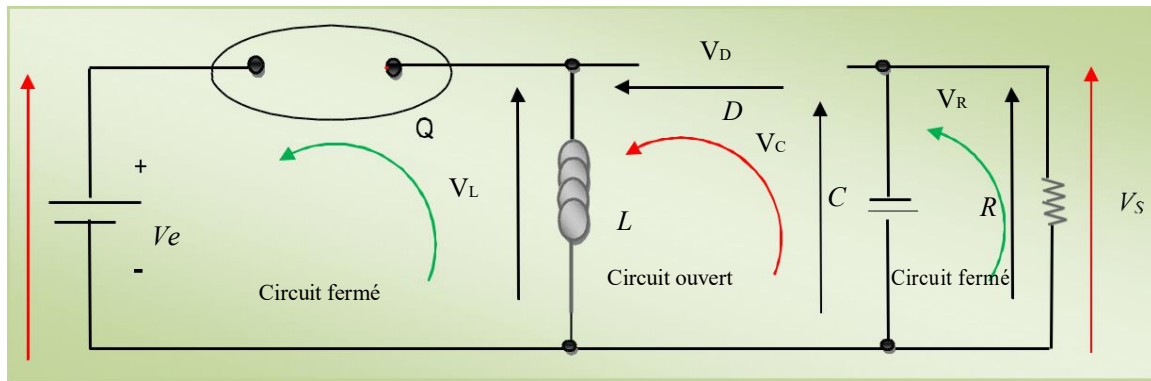


Figure 2. 19: Convertisseur Buck-Boost Durant l'état On.

a.1) L'équation de la Tension :

Pour Q fermé on a les équations des tensions

$$= 0 \text{ et } = - - \quad (2.41)$$

Alors la tension aux bornes de l'inductance sera :

$$= = \geq 0 \quad (2.42)$$

a.2) L'équation du courant :

Pour Q fermé on a l'équation de courant  $i_L$  sont

$$= - + \quad (2.43)$$

B) Pour Toff

(Q ouvert) : le blocage de l'interrupteur Q provoque la décharge de l'inductance dans la charge R et le condensateur C. Cette décharge peut être totale ou partielle.

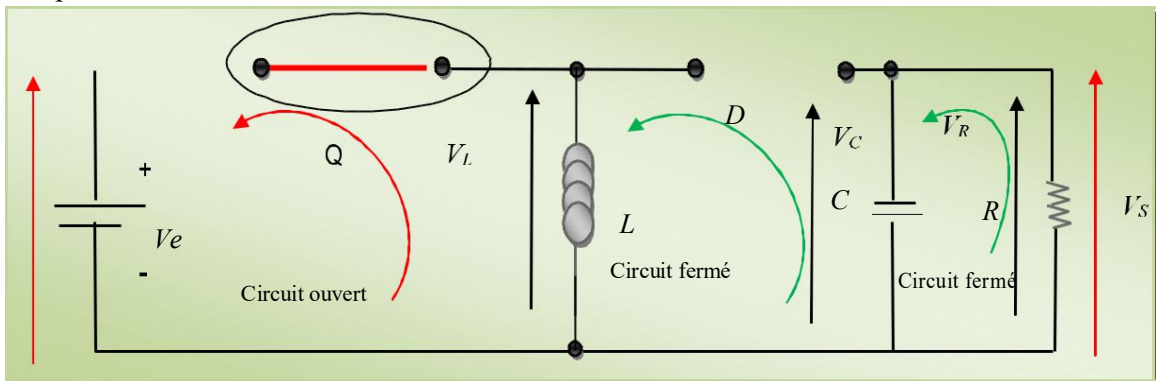


Figure 2.20: Convertisseur Buck-Boost Durant l'état Off.

**b.1) L'équation de la Tension :**

Pour Q ouvert, les équations des tensions sont

$$= 0 \text{ et } = + \tag{2.44}$$

Alors la tension sera :

$$= - \quad = \leq 0 \tag{2.45}$$

**b.2) L'équation du courant :**

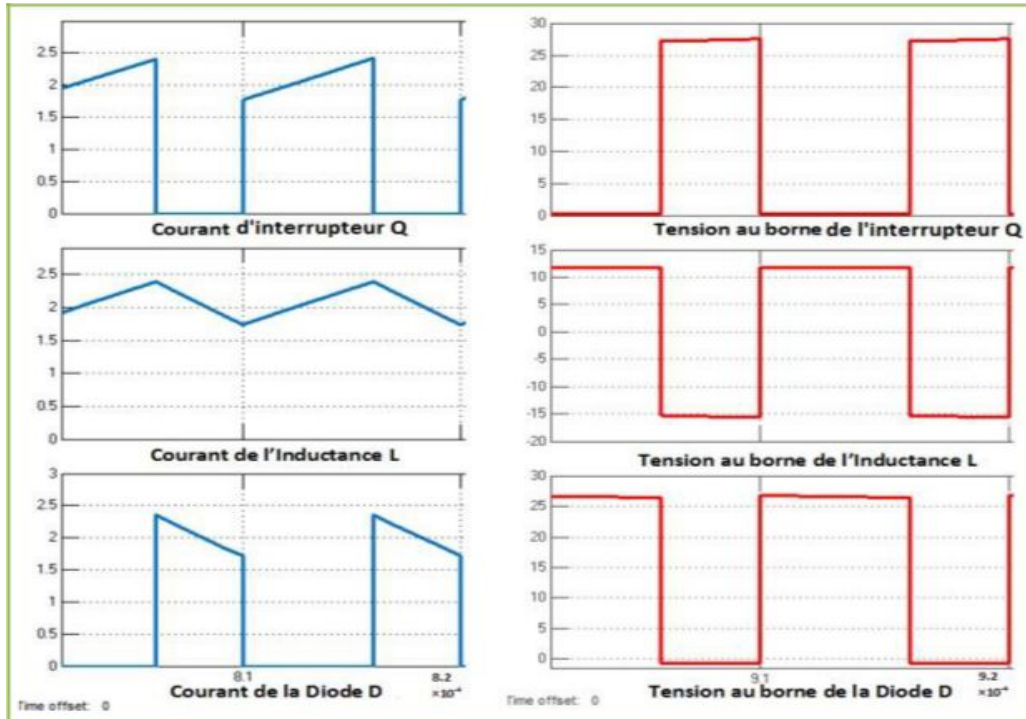
Pour Q ouvert, on a l'équation de courant  $i_L$  sont

$$= \frac{-}{+} \tag{2.46}$$

Alor on peut conclure que la tension et courant de sortie et:

$$= \frac{-}{(-)} = \frac{-}{(-)} \text{ Avec } \alpha > 1 \tag{2.47}$$

Les caractéristiques des tensions et des courants du convertisseur Buck-Boost dans le cas de la conduction continue sont décrites comme suit [40]:



**Figure 2.21 :** Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Buck-Boost .



### 2.2.4 Comparaison entre les différents types de convertisseur DC-DC

Le tableau 2.1 représente la comparaison entre les trois types des convertisseurs à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques [47-48].

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

Type d'hacheur DC-DC	Rapport de transformation	Application
Hacheur en série	$\alpha$	Convertie sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure
Hacheur en parallèle	$1/(1 - \alpha)$	Convertie une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur
Hacheur en 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

### 2.3 Modélisation du hacheur survolteur (boost) d'un système photovoltaïque

La figure (2.22), représente le schéma d'un hacheur parallèle (Boost) raccordé au générateur photovoltaïque GPV.

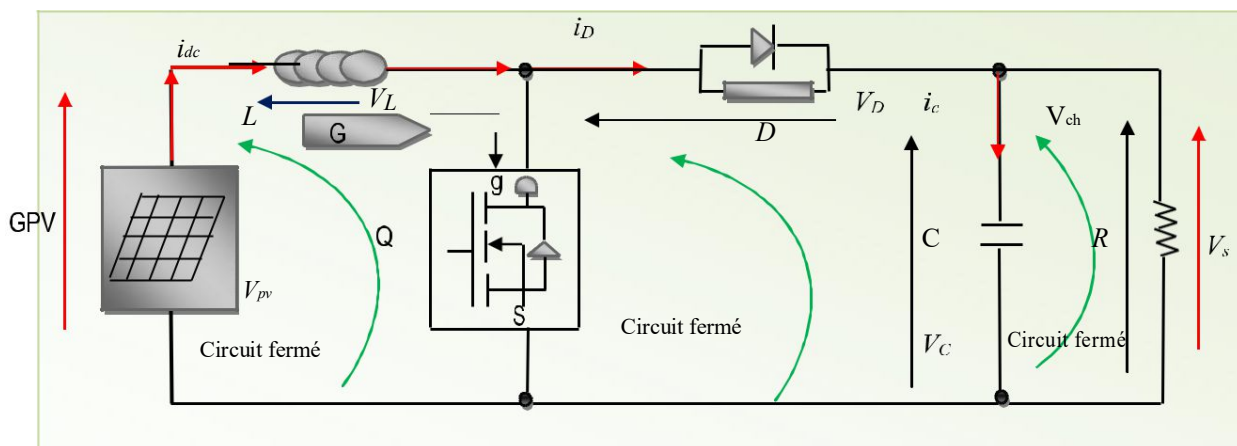


Figure 2.22:Schéma d'un hacheur parallèle (Boost) raccordé au générateur photovoltaïque.

Le hacheur élévateur de la figure (2.22) est constitué d'un semi-conducteur est un hacheur à transistor de type parallèle alimenté sous la tension  $U_{ph}$  délivrée par :

- la source, qui se comporte en interrupteur commandé à l'amorçage transistor de type MOSFET et une diode de manière périodique.
- 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.

La tension et courant de sortie en régime établi selon :

$$= \frac{1}{(-1)} \quad \text{Avec } \alpha > 1 \quad (2.48)$$

$$= (-1) \quad (2.49)$$

## 2.4 Electronique de puissance et d'énergie des convertisseurs

### 2.4.1 Electronique de puissance :

L'électronique de puissance est la branche de l'électrotechnique qui a pour objet de l'étude de la conversion statique d'énergie électrique (notamment les structure les composants, les commandes et les interactions avec l'environnement).

L'électronique de puissance traite l'énergie électrique par voie statique. Elle permet :

- Une utilisation plus souple et plus adaptée de l'énergie électrique
- Une amélioration de la gestion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique
- Une discrétion par réduction des masses et des volumes ainsi par un fonctionnement ultrasonore des dispositifs.

### 2.4.2 Convertisseurs des Puissances

La conversion statique est réalisée au moyen de convertisseur statique qu'ils sont des dispositifs qui transforme l'énergie électrique disponible en une forme appropriée à l'alimentation d'une charge [49].

L'énergie électrique est surtout distribuée sous forme de tensions alternatives sinusoïdales ou continues. L'électronique de puissance permet de modifier la présentation de l'énergie

électrique pour l'adapter aux différents besoins. L'électronique de puissance utilise des convertisseurs statiques. Ces derniers utilisent des interrupteurs électroniques [52].

### 1- Définition puissance :

Considérons un convertisseur statique quelconque relié à un récepteur. Nous adopterons la convention « générateur » pour le convertisseur et donc la convention « récepteur (ou charge ) » pour le récepteur (figure 2.23). [47].

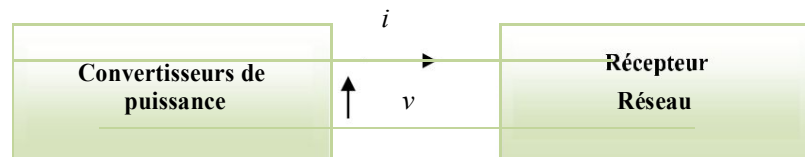


Figure 2.23: Couplage de convertisseur avec un récepteur.

#### a. Puissance instantanée

La puissance instantanée est, comme en régime continu, définie par le produit «courant × tension ». En principe, cette puissance est variable dans le temps.

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.50)$$

Où puissance en [watt] , Tension en [V] et Courant en [A].

**Remarque :** Si la puissance  $p$  est supérieur à 0 ( $p > 0$ ) alors le convertisseur fournit la puissance.

#### b. Puissance active

La puissance active  $P$  est la valeur moyenne de la puissance instantanée  $P(t)$  :

$$P(t) = \langle v(t) \cdot i(t) \rangle \quad (2.51)$$

Ce n'est qu'en régime sinusoïdal alternatif que l'on a :

$$P(t) = V \cdot I \cdot \cos(\phi) \quad (2.52)$$

Où  $\phi$  la phase

#### c. Puissance apparente

La puissance apparente  $S$  est définie par le produit «  $V_{eff} \times I_{eff}$  ». C'est une grandeur théorique qui sert à dimensionner les générateurs :

$$= V_{eff} \times I_{eff} \quad (2.53)$$

➤ **Facteur de puissance :**

Pour évaluer ce phénomène, on définit le facteur de puissance  $k$  ( $k < 1$ ) :

$$= \langle v(t) \cdot i(t) \rangle / (V \cdot I) \quad (2.54)$$

Pour un mauvais facteur de puissance ( $k$  et proche de 0), le courant  $I$  peut devenir très élevé. Ce n'est qu'en régime sinusoïdal que l'on a :

$$= \cos(\phi) \quad (2.55)$$

Où  $\phi$  la phase.

### 2.4.3 Convertisseurs d'Énergie

Le convertisseur agit sur une énergie pour la changer en une autre énergie pour obtenir un nouvel effet recherché par l'être humain, ou la nature.

- **Énergie & Puissance**

L'énergie et la puissance ces deux entités sont distinctes mais reliées par une relation simple qui fait intervenir le temps:

$$E(t) = P(t) \cdot t \text{ [Watt seconde] ou [Joule].} \quad (2.56)$$

### 2.4.4 Fonctionnement du convertisseur électronique de puissance

Dans le block convertisseur de puissance d'un DC/DC d'un système photovoltaïque convertie en tension électrique, connaissant la consommation (kWh), on calcule l'énergie nécessaire que doit avoir le générateur PV, on en déduit aussi la puissance crête.

La figure (2.25) représente le convertisseur électronique de puissance de type commutation.



**Figure 2.24:** Convertisseur de commutation

Avec  $P_{in}$  : puissance d'entrée et  $P_{out}$ : puissance de sortie.

## 2.5 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque et contrôlé par MPPT

### 2.5.1 Principe De La Commande MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{PPM}$  et  $I_{PPM}$ ). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT [29]. Il peut être représenté par le schéma de la Figure 2.25.

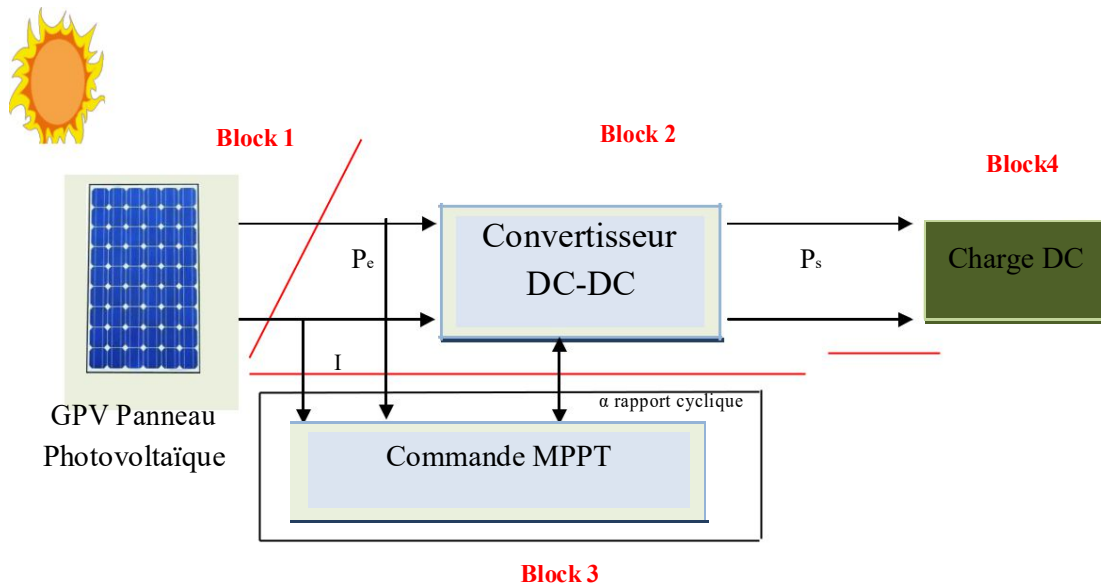


Figure 2.25 : Chaîne de conversion d'énergie solaire.

Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant des blocks suivant : générateur photovoltaïque (block 1), un convertisseur statique de puissance type BOOST (block 2), une commande MPPT (block 3) et une charge (block 4).

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 statique en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (courant  $I$  et tensions  $V$  et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu' il se placer sur le MPP (figure 2.26). [8].

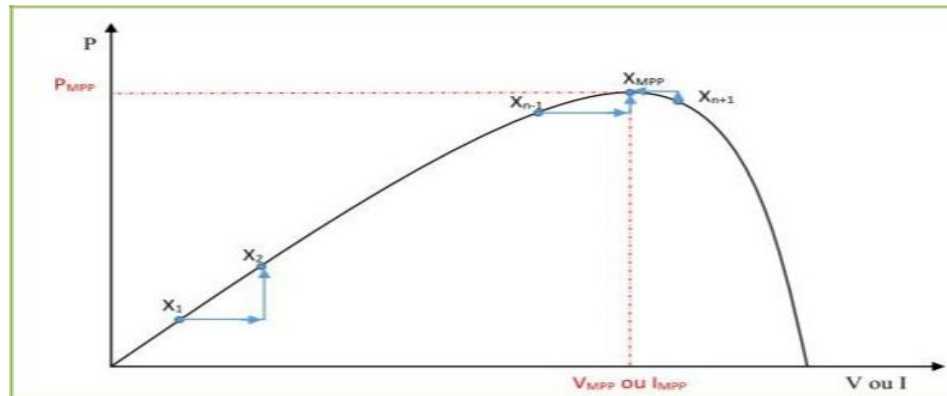


Figure 2.26 : Principe de la commande MPPT.

Le rendement MPPT ( $\eta_{MPPT}$ ) est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$  [54].

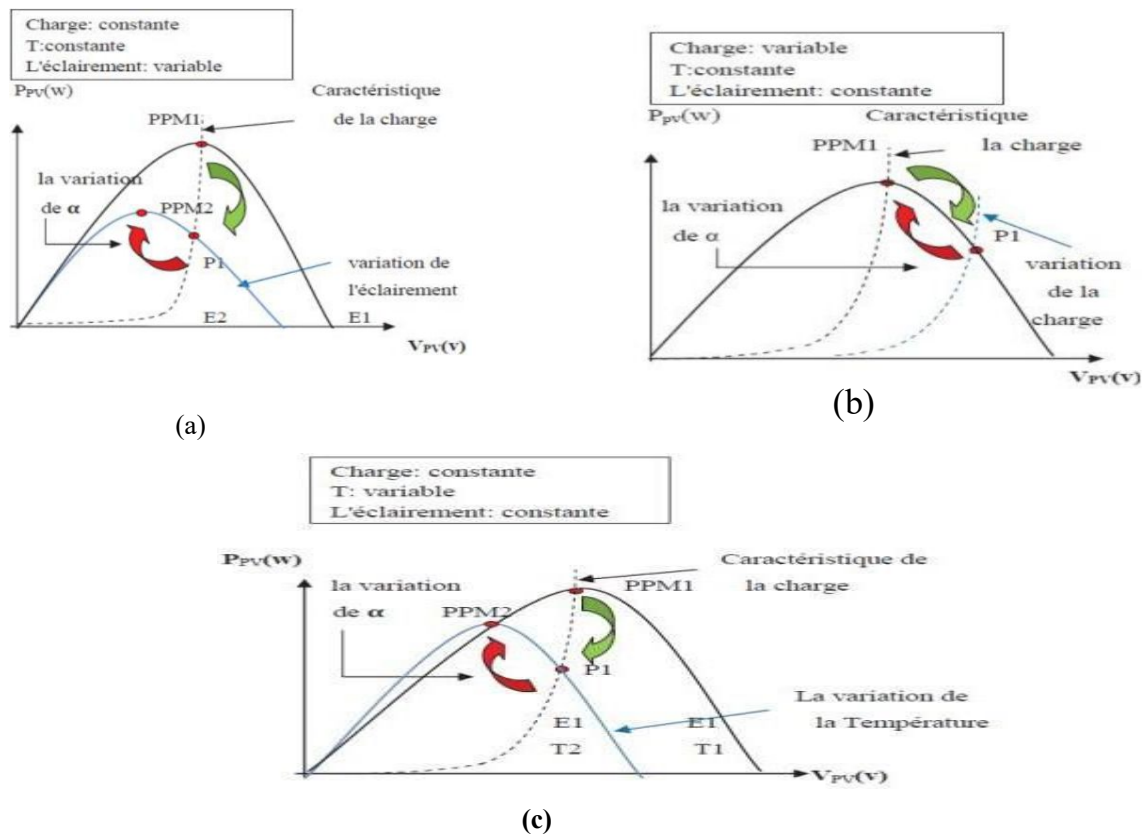
$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{Max}}{P_{in}} \quad (2.57)$$

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

## 2.5.2 Gestion de la MPPT

La figure (2.27) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 disfonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Dans ce cas, pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2 [41][52]. Dans le second cas, pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

Enfin dans le dernier cas, une variation du point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV, bien qu'il faut également agir au niveau de la commande. [41][55].



**Figure 2.27 :** Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.

## 2.6 Cheminement maximum de Power Point (MPPT)

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracker) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens [4].

### 2.6.1 Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque :

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable

de type photovoltaïque PV. Ces techniques se différencient entre eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [4].

### 2.6.1.1 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.

#### *Simple « perturbez et observez » l'algorithme de cheminement de MPP :*

La méthode de perturbation et d'observation «P&O» est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque  $V_{ref}$  et  $I_{ref}$  respectivement.

Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température. C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de  $V_{ref}$  ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique.

L'avantage de cette méthode c'est qu'elle a la particularité d'avoir une structure de régulation simple, et peu de paramètre de mesure. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température, pour toutes ces raisons, la méthode P&O est devenue une approche largement répandue dans la recherche du MPPT [8].

La figure (2.29) montre l'organigramme de l'algorithme de P&O tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de control.



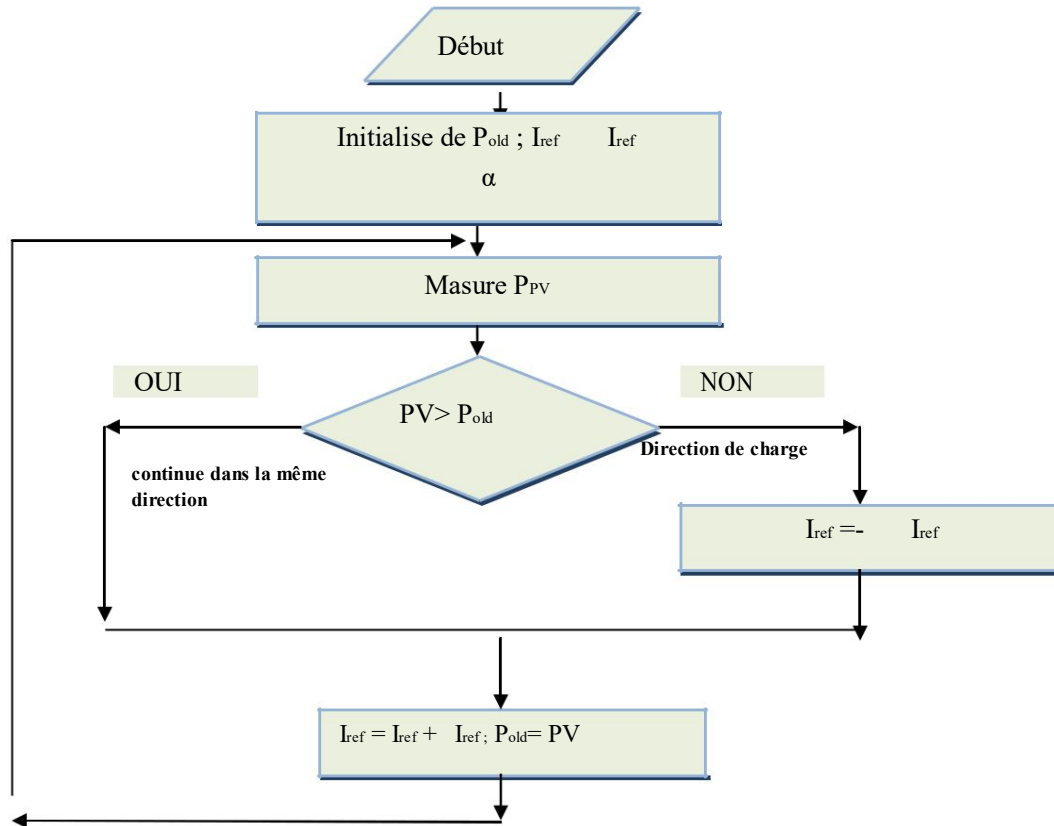


Figure 2.28 : Organigramme de l’algorithme Perturbation et Observation (P&O).

### 2.7 Les convertisseurs DC/AC (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 [25].

Figure (2.29) représente schéma de principe de l’onduleur.

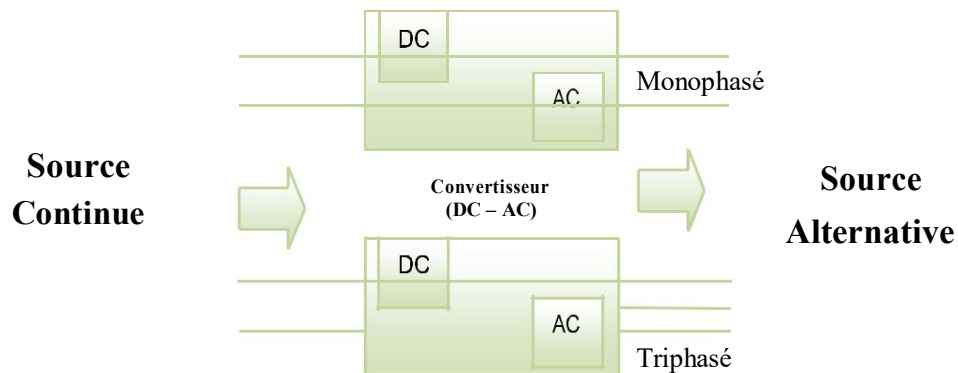


Figure 2.29 : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative DC-AC monophasé et triphasé.

### 2.7.1 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 [54]. Deux 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.

Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie [54].

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 [55].

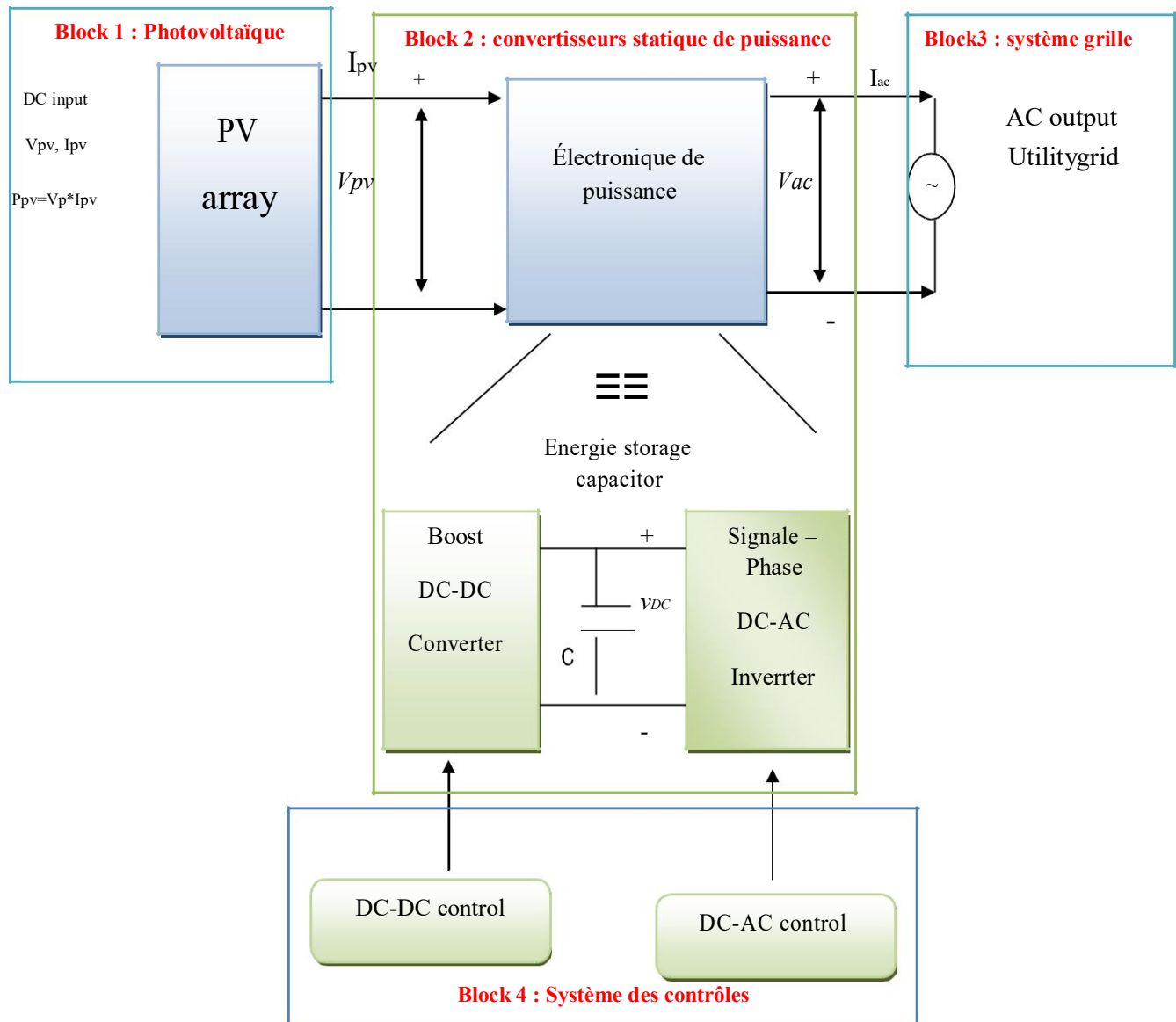
## 2.8 Modulation d'impacte d'énergie du système photovoltaïque connecté au réseau

### 2.8.1 Système photovoltaïque relié à une grille

La puissance photovoltaïque assurée à la grille de service gagne de plus en plus la visibilité, alors que la demande de la puissance mondiale augmente. Elle enregistre une augmentation exponentielle avec l'Allemagne et le Japon menant la liste des pays ayant la plus grande capacité installée. Disponibilité sans conditions de la source d'énergie l'amitié environnementale de ces systèmes sont terminées leurs avantages importants les sources d'énergie traditionnelles telles que le pétrole et le gaz naturel, mais leur efficacité et contrôlabilité support comme inconvénients principaux.

En plus de ceci, les opérateurs du système de transmission sont imposants normes dures, quand 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. Tous les systèmes photovoltaïques connectent la grille de service par un inverseur de source de tension et a convertisseur de poussée. Le générateur photovoltaïque s'est relié par des inverseurs au réseau de distribution sous une climatique standard condition ( $1000 \text{ W/m}^2$  et  $25^\circ\text{C}$ ) [53].

Figure (2.30) : Une réalisation possible d'une électronique de puissance pour le système relié à une grille de PV[56].



**Figure 3.30:** Architecture possible du système PV avec contrôleur raccordée au réseau (Une réalisation possible de convertisseur de puissance) .

Le modèle de conception de la chaîne système photovoltaïque avec commandes des contrôles contient des quatre blocks suivant :

- **Block 1** : Block générateur photovoltaïque.
- **Block 2** : convertisseurs statique de puissance
- **Block 3** : système grille
- **Block 4** : Système des contrôles

## **2.9 Conclusion**

La modélisation du système photovoltaïque est une étape essentielle qui nous permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément ainsi que les paramètres constitutants. 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. Enfin, nous avons nous avons donné la topologie d'un système photovoltaïque-réseaux. Cette modélisation est une étape essentielle, elle va nous permettre d'étudier la simulation du système photovoltaïque relié à une grille dans le chapitre trois qui suivent.

# *Chapitre 3*

*Simulation et Performance d'impact  
énergie du système Ptf*

## *Simulation*

### **3. Introduction :**

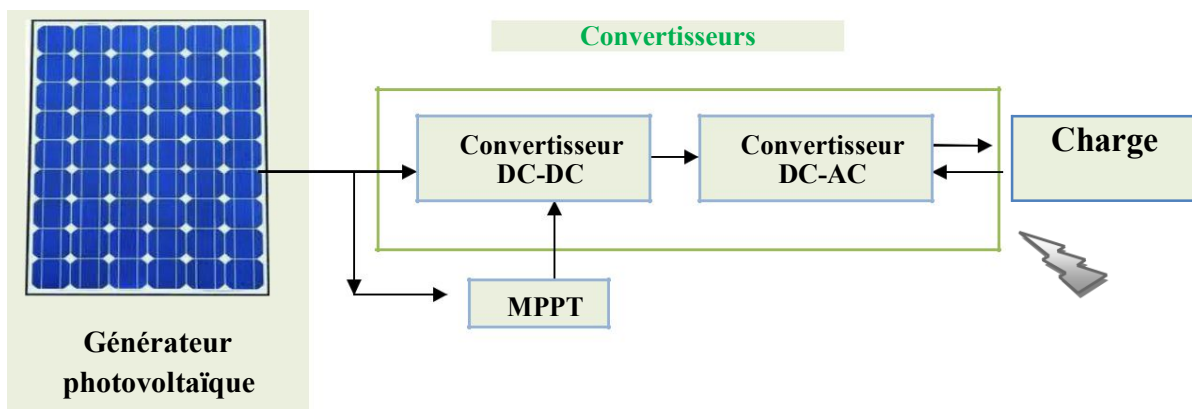
Dans ce chapitre, nous avons simulé sous l'environnement MATLAB /SIMULINK tous les équipements présenterons la chine du système énergétique photovoltaïque PV connecté au réseau de distribution, on espère toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP. Nous allons aussi présenter un système de gestion, qui a pour but de contrôler l'énergie et la puissance produite par les panneaux photovoltaïques .

Pour cela Nous offrons simulons d'abord un certain nombre de convertisseurs (DC-DC) et des convertisseurs onduleurs (DC-AC) pour choisisez le meilleur en termes de quantité d'énergie produite, puis insères les deux convertisseurs dans système de PV puis simulons les composants du centrale solaire connecté au réseau et simuler le système PV global connectée au réseau utiliser le mécanisme par d'algorithme MPPT. Enfin, on présente les résultats de simulation de la chaîne de système PV, ensuite faire une étude sur la puissance moyenne et le stockage d'énergie dans la batterie Toutes les opérations de simulation sont effectuées (sous Matlab/ Simulink) avec un pas de calcul de  $10^{-4}$  s.

### **3.1 Modélisation d'un système photovoltaïque :**

#### **3.1.1 Le générateur photovoltaïque « GPV » :**

Le système photovoltaïque est contrôlé par la commande MPPT, il est présenté à la figure (3.1).



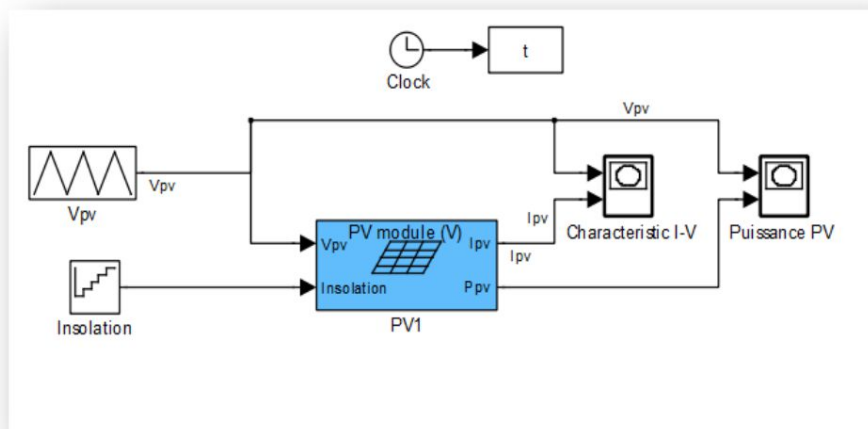
**Figure 3.1:** Système photovoltaïque.

Le modèle global du système photovoltaïque représenté par la figure (3.1) est constitué de:

- **Générateur photovoltaïque** : Formé de modules avec un nombre de cellules en série. Nous avons étudié l'influence des paramètres extérieurs, l'éclairement et la température sur les caractéristiques (courant-tension, puissance-tension).
- **Convertisseur DC-DC** : Ce convertisseur est connu par le nom d'élevateur de tension, qui est l'étage d'adaptation (DC-DC) entre le (GPV) et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé, système autonome.
- L'étage d'adaptation dispose d'une commande (MPPT) (Maximum Power Point Tracking)
- **Convertisseur DC-AC** : Il ya plusieurs type d'onduleur qui peut installer avec un réseau, sont caractérisés par leur technologie et par la forme d'onde qu'ils génèrent : Onduleur à onde sinusoïdale, Onduleur à onde carrée, Onduleur à onde pseudo-sinusoïdale ....etc. On va choisir dans ce travail l'onduleur à triphasé.
- **La charge** : nous avons choisi une charge équilibrée (RL) sur le côté (AC) Alternatif.
- **Le réseau électrique**: Il représente le réseau électrique de distribution publique .

### 3.1.2 Modèle d'une cellule photovoltaïque sous Matlab

La bibliothèque Sim Power Systems du logiciel de simulation MATLAB sera utilisée pour réaliser du modèle de simulation d'une cellule photovoltaïque réelle, il est représenté à la figure (3.2) [56].

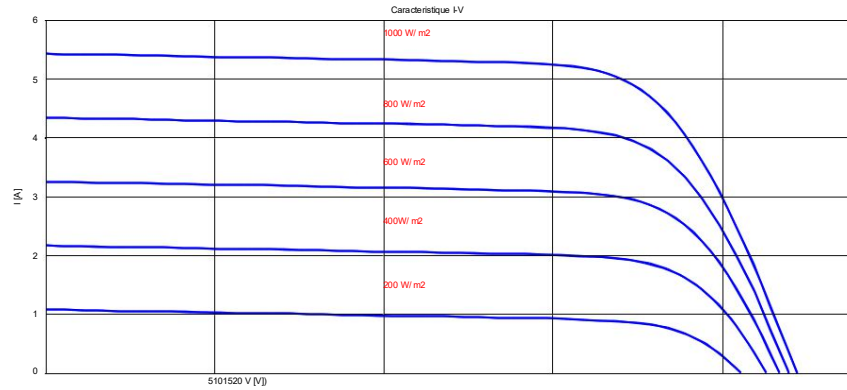


**Figure 3.2** : Modèle de simulation d'une cellule photovoltaïque réelle.

**Les résultats de simulation et interprétation.**

Des résultats des courbes pour différents grandeurs sont illustrés sur les figures (3.3 ,3.4).

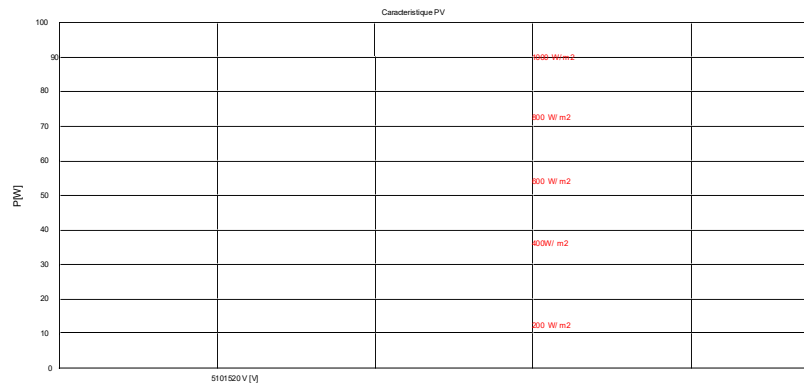
La figure (3.3), représente des résultats de simulation de module PV Caractéristique ( $I_{pv} = f(V_{pv})$ ) : À température ( $T = 25C^{\circ}$ ). Et l'éclairement ( $E$ ) entre 200 et 1000  $w/m^2$ .



**Figure 3.3 :** Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension Pour différents insolation et une température  $T=25^{\circ}C$ .

D'après la figure (3.3), on remarque une forte diminution du courant de court-circuit Par rapport à l'insolation et une faible diminution de la tension du circuit ouvert. C'est qui prouve que le courant de court circuit de la cellule dépend au éclairement, par contre la tension de circuit ouvert subit une légère augmentation quand l'éclairement varie de 200  $W/m^2$  à 1000  $W/m^2$ .

La figure (3.4) représente des résultats de simulation de Module PV Caractéristique ( $P_{pv} = f(V_{pv})$ ) : À température ( $T = 25C^{\circ}$ ). Et l'éclairement ( $E$ ) entre 200 et 1000  $w/m^2$ .



**Figure 3.4:** Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension Pour différents insolation et une température  $T=25^{\circ}C$ .

D'après la figure (3.4), on remarque que, l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension du circuit ouvert du GPV.

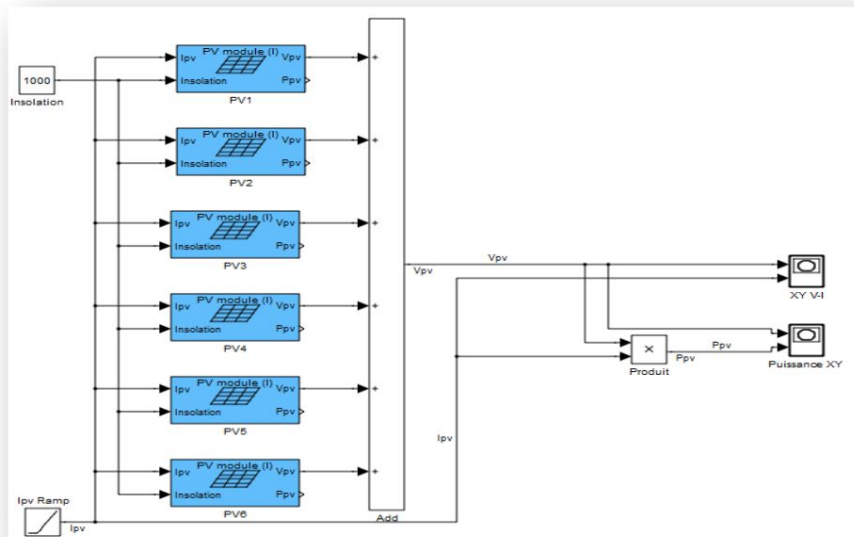


### 3.1.3 Générateur photovoltaïque

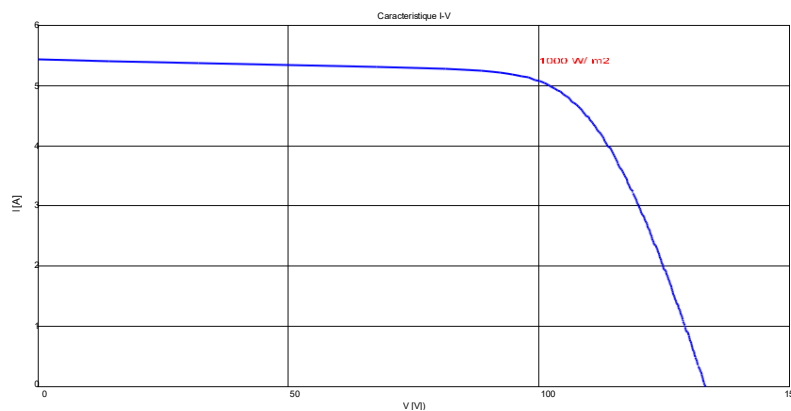
On va choisir dans ce travail le générateur PV de six modules en série à température ( $T = 25C^{\circ}$ ). Et l'éclairement ( $E$ )  $1000 \text{ w/m}^2$ .

#### 3.1.3.1 Simulation de modules PV :

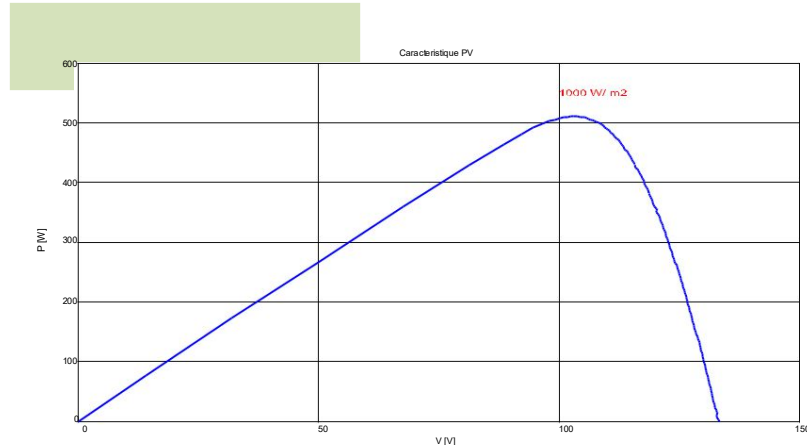
La bibliothèque Sim Power Systems du logiciel de simulation MATLAB sera utilisée pour réaliser l'analyse comportementale de circuits électriques correspondant aux modèles mathématiques des différentes parties de la centrale. Ces expressions étant des équations à fonctions variables (tension, courant, temps de simulation) amènent à utiliser des sources de tension et de courant contrôlées. Ensemble photovoltaïque constitué de six modules PV de 85 W connectés en série



**Figure 3.5 :** Ensemble photovoltaïque constitué de six modules PV connectés en série.



**Figure 3.6 :** Résultats de simulation des caractéristiques (I-V) des six modules PV connectés en série.



**Figure 3.7 :** Résultats de simulation des caractéristiques (P-V) des six modules PV connectés en série.

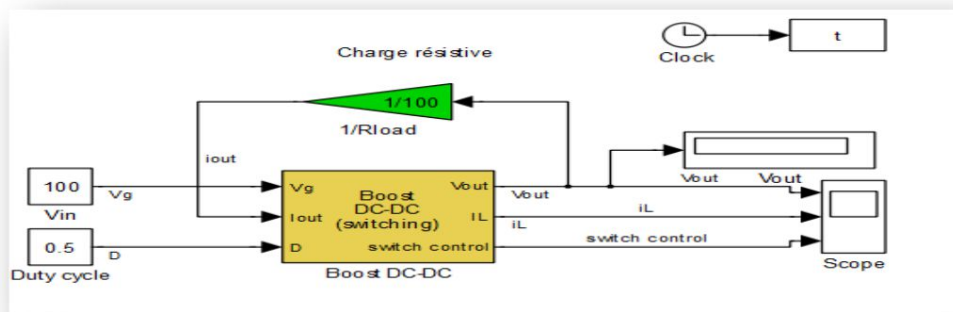
**3.1.3.2 Simulation des Convertisseurs DC-DC (hacheurs) :**

Pour montrer le rôle de convertisseur Boost (step-up) en mode commuté nous avons utilisé Matlab pour la simulation et les paramètres sont donnés dans le tableau (3.1):

**Tableau 3.1 :** Valeurs des paramètres de simulation.

Les paramètres de simulation DC-AC	La valeur de chaque paramètre
tension d'entrée $V_g$	100 V
Inductance L	200 $\mu$ H
Capacitance C	10 $\mu$ F
Résistance de charge R	$R = 100\Omega$
Commutateur cycle de service D	0,5
Courant d'entrée $I_g = I_L$	4 A
Commutation fréquence $f_s$	100 kHz
Période de commutation T s	10 $\mu$ s
temps	1/10 s

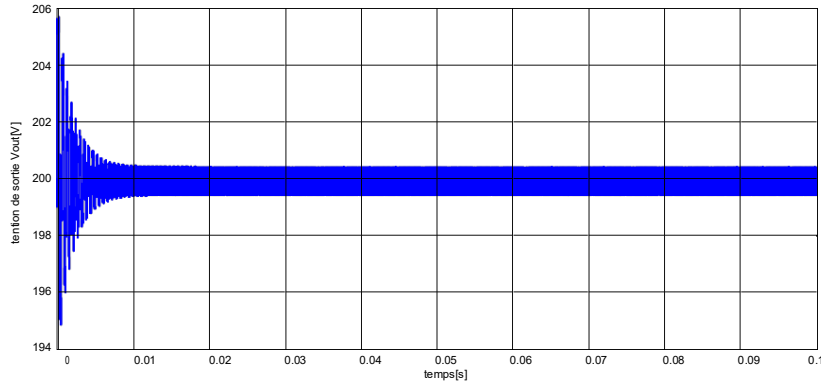
La figure (3.8), représente le schéma simulink d'un convertisseur DC-DC Boost (step-up) [56].



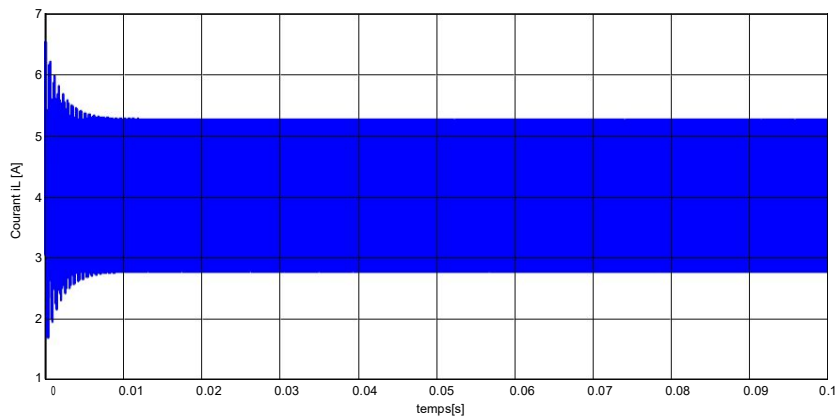
**Figure 3.8:** Schéma de simulation d'un hacheur DC-DC Boost (step-up) .

- **Les résultats de la simulation :**

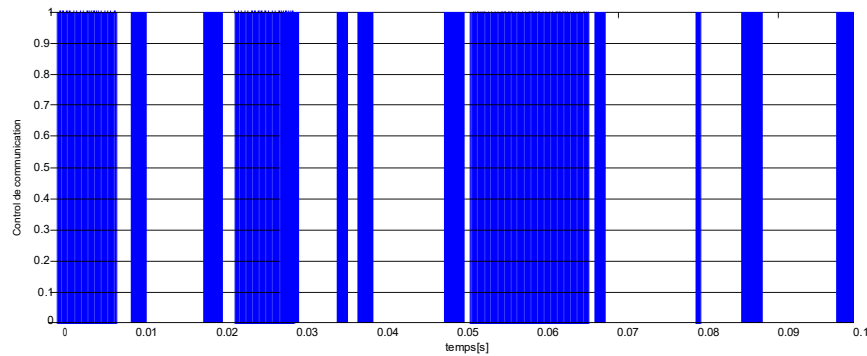
Des résultats des courbes pour différents grandeurs sont illustrés sur les figures (3.9, 3. 10 et 3.11).



**Figure 3.9:** Résultats de simulation de la tension de sortie Volt En fonction du temps.



**Figure 3.10:** Résultats de simulation du courant de l'inductance  $I_L$  En fonction du temps.



**Figure 3.11:** Résultats de simulation du commutateur de contrôle En fonction de temps.

On remarque que a partir des ce ces figures (3.9, 3.10 et 3.11) les résultats de simulation de la tension de sortie et le courant d'inductance et Commutateur de contrôle En régime permanent, et aussi on remarque que la tension de sortie oscille autour de 200v et lorsque la tension de sortie augmentée le courant d'inductance va diminuer et le commutateur de control est variée entre 0 et 1.

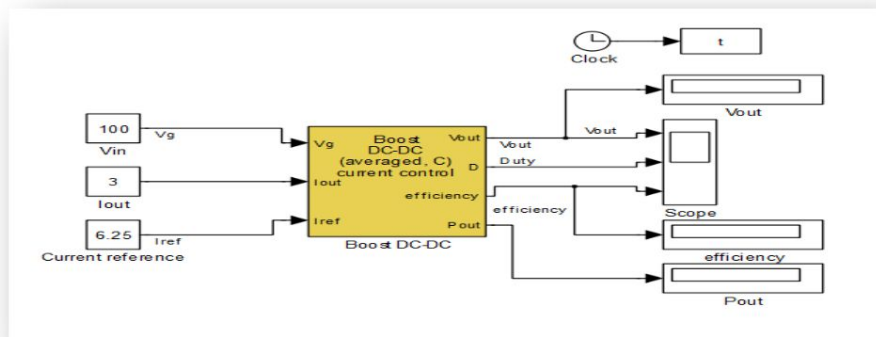
### 3.1.3.3 Modèle moyenné (averaged) du convertisseur boost DC-DC avec contrôle de courant d'entrée :

Pour montrer le rôle de Modèle moyenné du convertisseur Boost avec contrôle de courant d'entrée nous avons utilisé les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau (3.2):

**Tableau 3.2 :** Valeurs des paramètres de simulation.

Les paramètres de simulation DC-AC	La valeur de chaque paramètre
V g	100 V
I out	3A
I ref	6,25A
temps	1/10 s

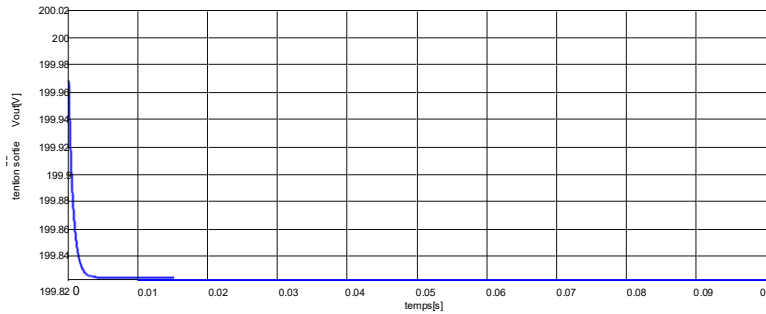
La figure (3.12), représente le schéma simulink d'un Modèle moyenné du convertisseur Boost DC-DC avec contrôle de courant d'entrée[56].



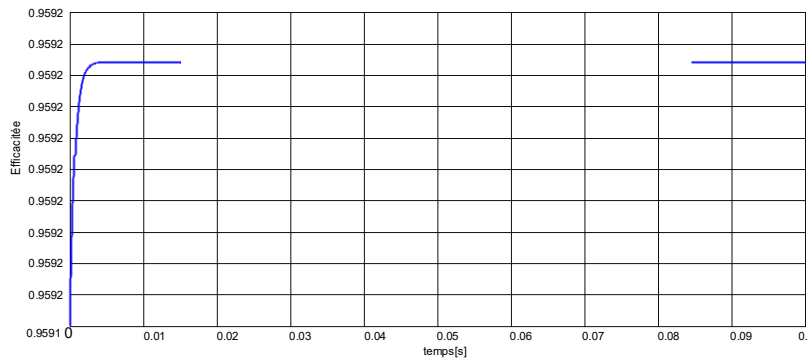
**Figure 3.12:** Schéma de simulation d'un Modèle moyenné (averaged) du convertisseur Boost DC-DC avec contrôle de courant d'entrée.

**- Les résultats de la simulation :**

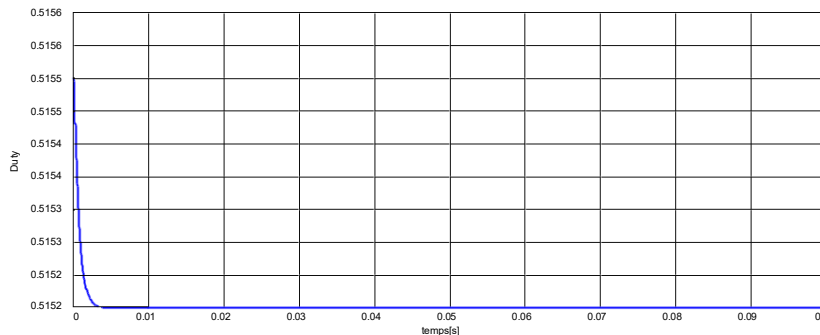
Des résultats des courbes pour différents grandeurs sont illustrés sur les figures (3.13, 3.14 et 3.15), représente des résultats de simulation de la tension de sortie et le rapport d'utilisation (duty) et l'efficacité



**Figure 3.13:**Résultats de simulation de la tension de sortie Volt en Fonction du temps.



**Figure 3.14:**Résultats de simulation de l'Efficacité en fonction du temps.



**Figure 3.15:**Résultats de simulation de la Duty en fonction du temps.

On remarque que a partir des ce ces figures (3.13, 3.14 et 3.15) les résultats de simulation , que la tension est diminuée est stabilisée dans la valeur  $\approx 199.9$  v et le même chose pour le

coefficient de l'utilisation diminuée est stabilisée dans la valeur 0,51 et l'efficacité doit être augmentée et en régime permanent l'efficacité stabilisée autour de  $\approx 0,95$ .

### 3.1.3.4 Sélectionnez le meilleur convertisseur DC-AC:

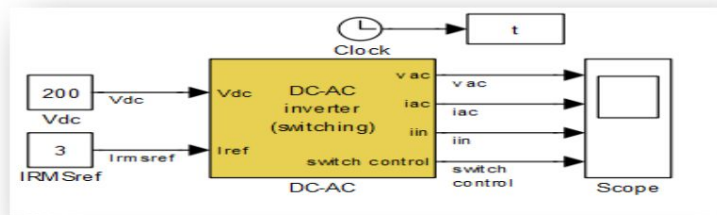
#### a) Simulation des Onduleur DC-AC :

Simulation d'un Onduleur DC-AC monophasé en mode commuté pour systèmes connectés au réseau: pour montrer le rôle d'Onduleur DC-AC monophasé en mode commuté pour systèmes connectés au réseau, et les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau (3.3):

**Tableau 3.3 :** Valeurs des paramètres de simulation.

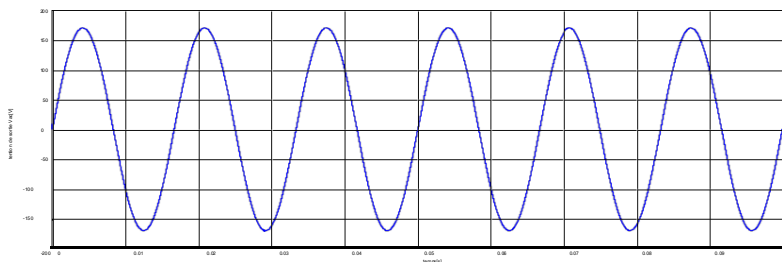
Les paramètres de simulation DC-AC	La valeur de chaque paramètre
V DC	200V
Inductance L	2 mH
I Mref	$= 3\sqrt{3} = 4.2$ A
temps	1/10 s

La figure (3.16), représente le schéma simulink d'un Modèle moyenné de l'Onduleur DC - AC[56].

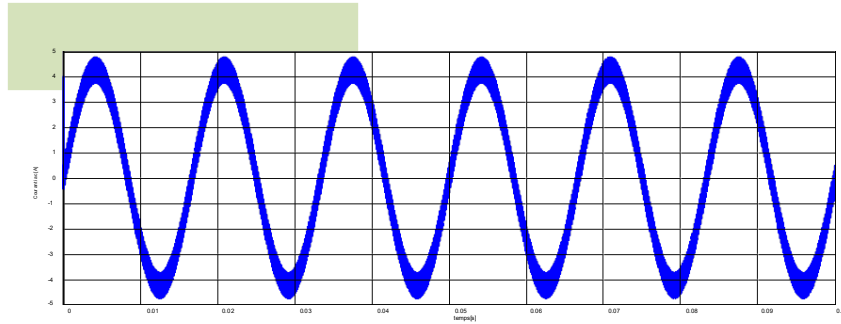


**Figure 3.16:** Schéma de simulation d'un Onduleur DC-AC monophasé en mode commuté pour systèmes connectés au réseau.

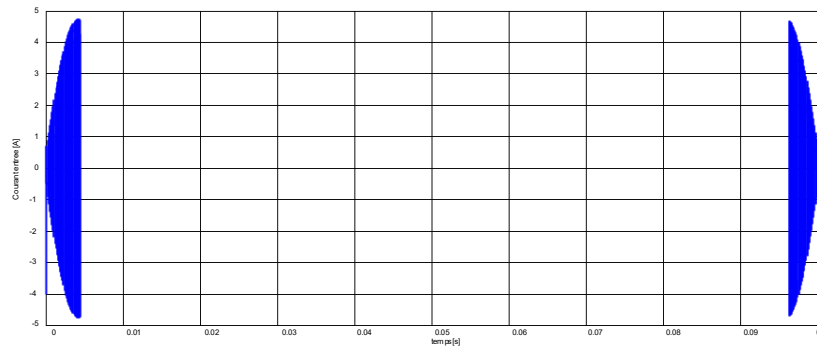
Des résultats des courbes pour différents grandeurs sont illustrés sur les figures (3.17, 3.18, 3.19 et 3.20), représente le formes d'ondes  $V_{ac}(t)$ ,  $I_{ac}(t)$ ,  $I$ -Entrée et commutateur de contrôle Sur une période de ligne AC (1/10s).



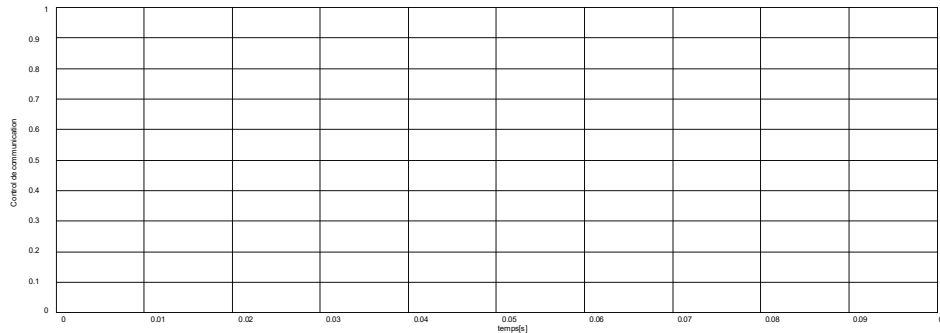
**Figure 3.17:** Résultats de simulation de la tension  $V_{ac}$  en fonction du temps.



**Figure 3.18:** Résultats de simulation du courant  $I_{ac}$  en fonction du temps



**Figure 3.19:** Résultats de simulation du courant  $I_{-Entrée}$  en fonction du temps.



**Figure 3.20:** Résultats de simulation du commutateur de contrôle en fonction du temps.

On remarque que a partir des ce ces figures (3.17, 3. 18, 3. 19 et 3.20) , les résultats de simulation d'un Onduleur DC-AC à mode commuté Avec ce contrôleur simple, la fréquence de commutation est variable.

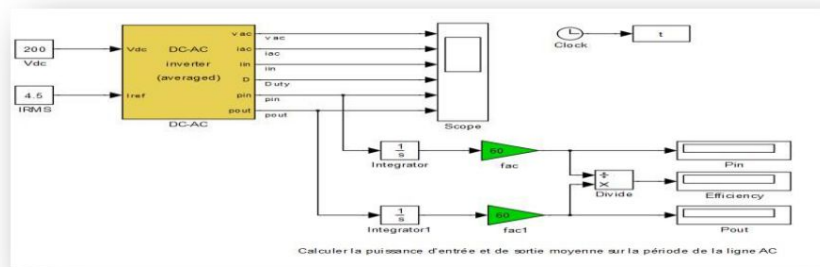
### **3.1.4.5 Onduleur DC-AC monophasé pour les systèmes connectent au réseau :**

Pour montrer le rôle d'Onduleur DC-AC monophasé pour les systèmes connecte au réseau et les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau (3.4):

**Tableau 3.4 :** Valeurs des paramètres de simulation.

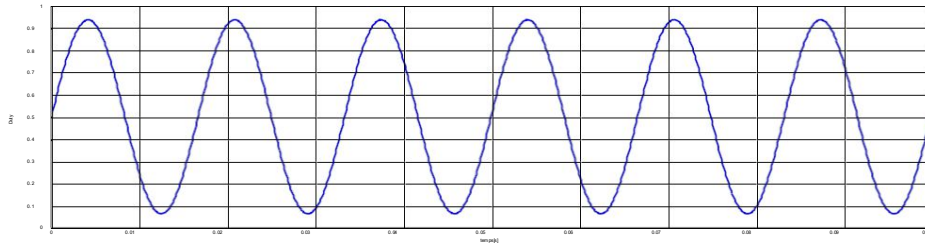
Les paramètres de simulation DC-AC monophasé	La valeur de chaque paramètre
Tension d'entrée V DC	200 V,
R L	0.8 $\Omega$ ,
I Mref	I sw = 50 mA,
P ac	0 to 600 W.
temps	1/10 s

La figure (3.21), représente le schéma simulink d'un Onduleur DC-AC monophasé pour les systèmes connectés au réseau.

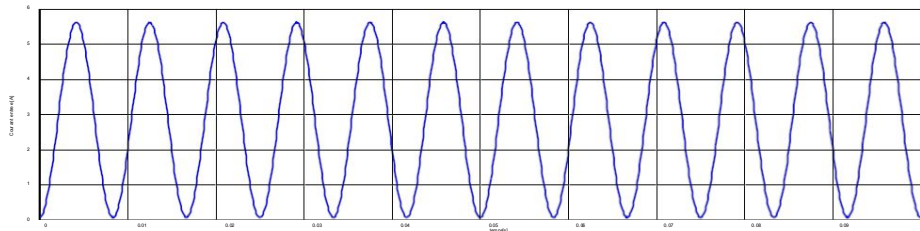


**Figure 3.21:** Schéma de simulation d'un Onduleur DC-AC monophasé pour les systèmes connectés au réseau.

Des résultats des courbes pour différents grandeurs sont illustrés sur les figures (3.22, 3. 23 , 3. 24, 3. 25, 3. 26 et 3.27) ,

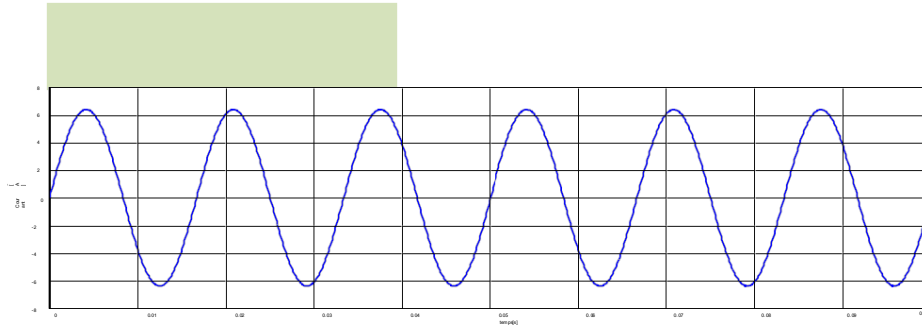


**Figure 3.22:**Résultats de simulation de la Duty en fonction du temps .

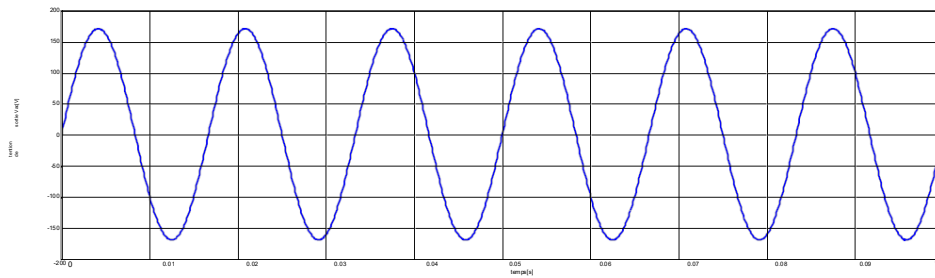


**Figure 3.23:**Résultats de simulation du courant d'entrée  $I_{in}$  En fonction du temps.

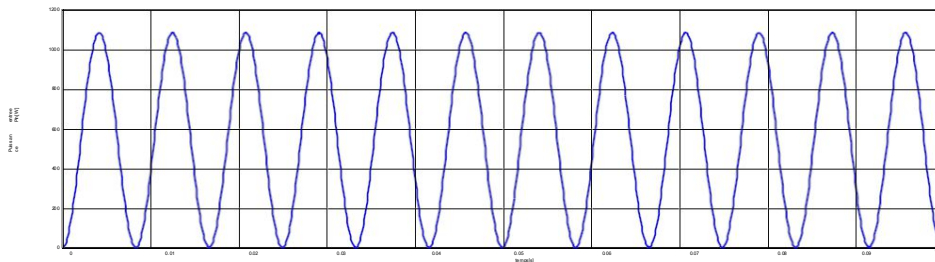




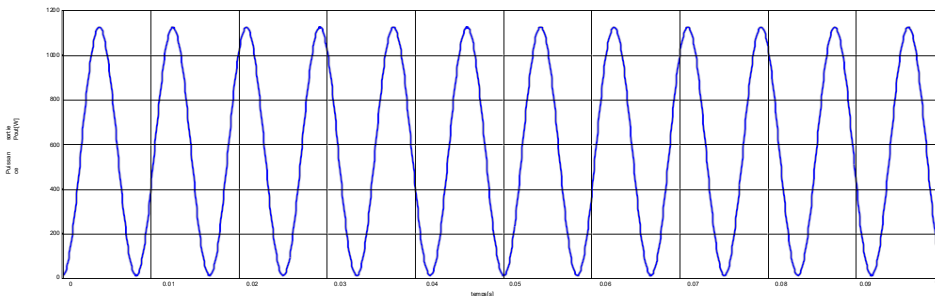
**Figure 3.24 :** Résultats de simulation de la courant  $I_{ac}$   
En fonctions du temps.



**Figure 3.25 :** Résultats de simulation de la tension  $V_{ac}$   
En fonction du temps.



**Figure 3.26:** Résultats de simulation de la Puissance de sortie  $P_{out}$   
En fonction du temps.



**Figure 3.27:** Résultats de simulation de la Puissance de entrée  $P_{in}$   
En fonction du temps.

On remarque que a partir des ce ces figures (3.22, 3. 23 , 3. 24, 3. 25, 3. 26 et 3.27) ,les résultats de simulation d'un Onduleur DC-AC monophasé pour les systèmes connectes au réseau : L'efficacité de l'onduleur d'environ 95% est typique :

- À des niveaux de puissance élevés, les pertes de conduction R L doivent dominer
- À faible puissance, l'efficacité diminue en raison de la commutation et d'autres pertes fixes.

### **3.2 Simulation et Performance d'un Système Globale du Système Photovoltaïque relié à une Grille:**

L'objective de cette section des simulations sont étude deux résultats de simulations:

1. La performance de premier système photovoltaïque caractérisée par convertisseur DC-DC sons commande MPPT, onduleur DC-AC connecté au réseau.
2. La performance de deuxième système photovoltaïque caractérisée par convertisseur DC-DC avec commande MPPT, onduleur DC-AC connecté au réseau.

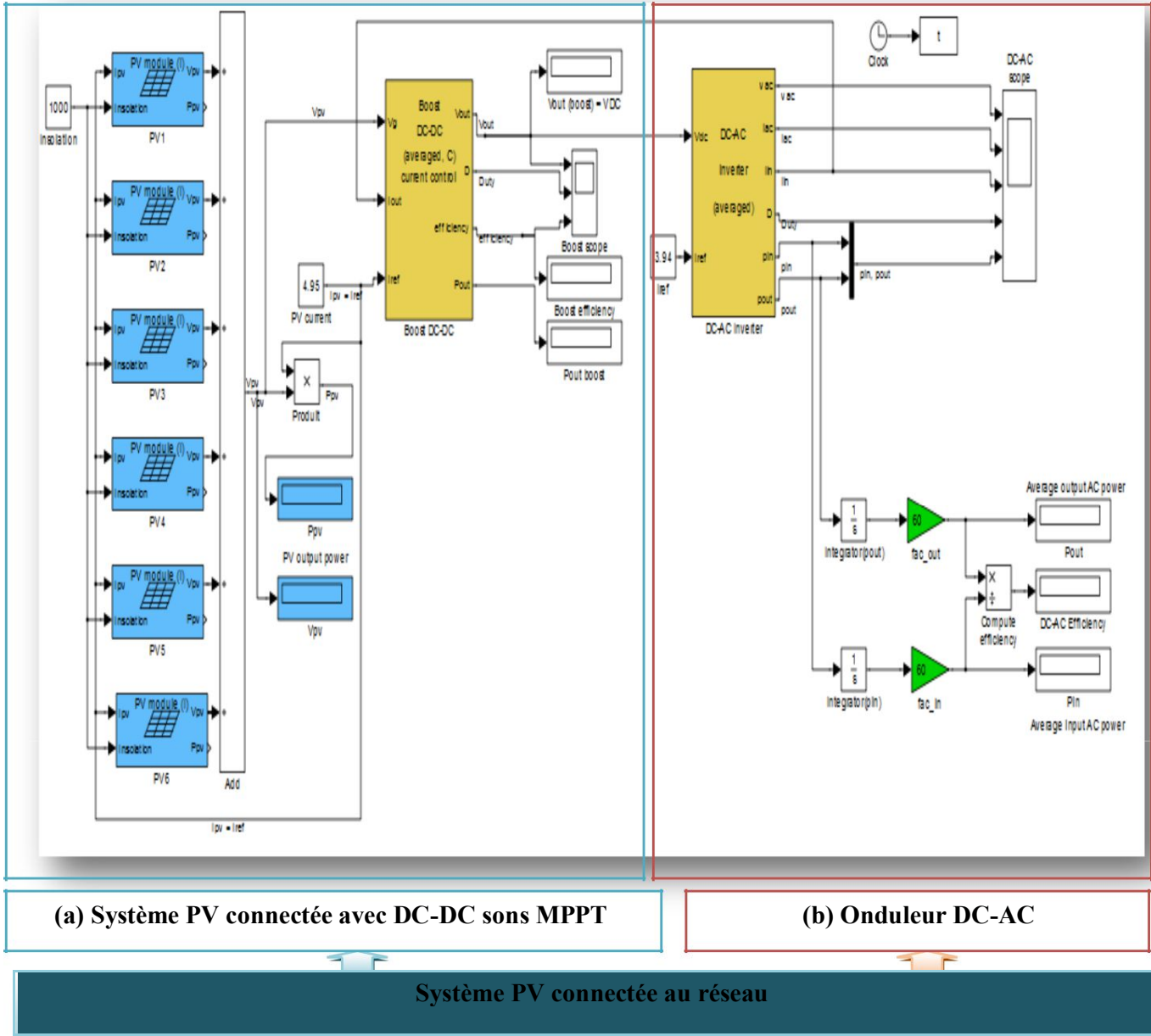
#### **3.2.1 Résultat de simulation du premier système DC-DC/DC-AC.:**

Le bloc de simulation représenté sur la figure (3.28) montre le comportement de cellule photovoltaïque Celui-ci donne des résultats des courbes pour différents grandeurs sont illustrés sur les figures ci-après.

## Simulation et Performance d'impact Energie du Système Photovoltaïque

La figure (3.28), représente schéma de Bloc de système PV connectée au réseau en simulink

**Simulation totale du système PV connectée au réseau :**



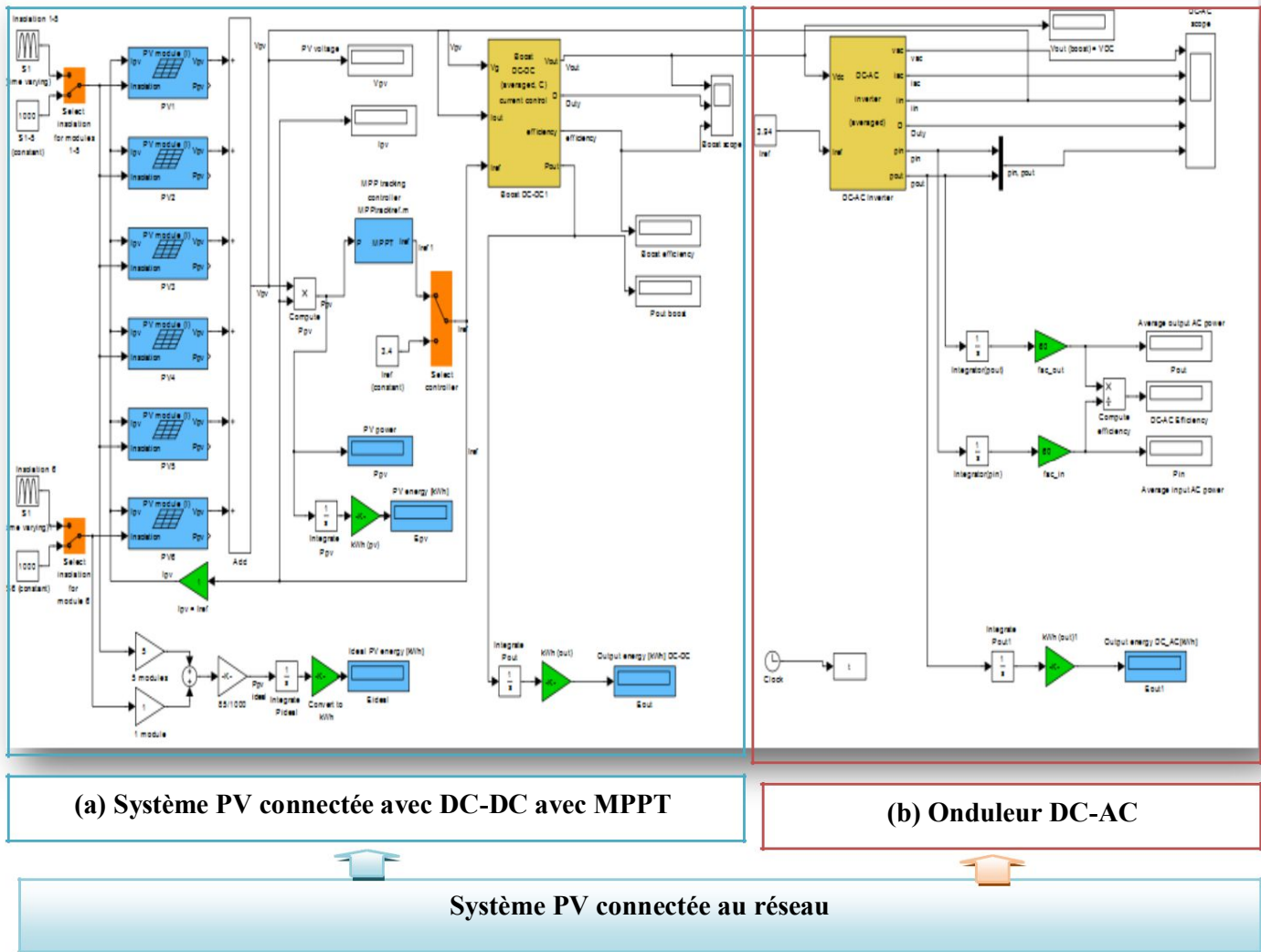
**Figure 3.28:** Bloc de système PV sans MPPT et convertisseur boosté DC-DC et Iref en Simulink .

### 3.2.2 Model système deux Convecteurs DC-DC et onduleur DC'AC avec MPPT.

Le bloc de simulation représenté sur la figure (3.29) montre le comportement de cellule photovoltaïque Celui-ci donne des résultats des courbes pour différents grandeurs sont illustrés sur les figures ci-après.

La figure (3.29) , représente schéma de Bloc de système PV connectée au réseau en simulink.

**Model de simulation totale du système PV connectée au réseau**



**Figure 3.29 : Bloc de système PV connectée au réseau en SIMULINK .**

**1) Résultat de simulation : Deux résultats des simulations sont A) Calcule la puissance :**

Résultat de simulation qui calcule des puissances et énergie à sortie de Hacheur et PV de Système PV connectée avec DC-DC avec MPPT (figure 3.29 :(a)). Avec ensemble de photovoltaïque constitué de : 1 jusque à 6 modules PV connectés en série avec différent éclairements sont : 100 ,500 et 1000. Tableaux (3.5 3.6et 3.7)

**Simulation et Performance d'impact Energie du Système  
Photovoltaïque**

**1<sup>ier</sup> résultats : avec éclairement 100.**

Calcule des puissances et énergie à sortie de Hacheur et PV de claiement 100. Avec ensemble photovoltaïque constitué de : 1 to 6 modules PV connectés en série avec claiement 100. Tableau (3.5)

**Tableau 3.5 :** Calcule des puissances et énergie à sortie de Hacheur et PV de claiement 100.

Nombre de cellule mode		1	2	3	4	5	6
Puissance	$P_{ideal}$	0.01419	0.02838	0.64257	0.05676	0.07095	0.07096
Puissance et énergie : Sortie DC-DC	$E_{dc-dc}$	0.007731	0.01546	0.02319	0.03092	0.03865	0.04638
	$P_{dc-dc}$	5.844	11.69	17.53	23.37	29.22	35.06
Puissance et énergie : Sortie PV	$E_{pv}$	-0.2142	0.00658	0.01428	0.02241	0.03053	0.03865
	$E_{pv}$	0.001966	5.629	11.47	17.32	23.16	0.03865

**2<sup>ème</sup> résultats : avec éclairement 500.**

Calcule des puissances et énergie à sortie de Hacheur et PV de claiement 500. Avec ensemble photovoltaïque constitué de : 1 to 6 modules PV connectés en série avec éclairement 500. Tableau (3.6)

**Tableau 3.6 :** Calcule des puissances et énergie à sortie de Hacheur et PV de claiement 500.

Nombre de cellule mode		1	2	3	4	5	6
Puissance	$P_{ideal}$	0.07095	0.1419	0.1419	0.2828	0.3548	0.4257
Puissance et énergie : Sortie DC-DC	$E_{dc-dc}$	0.06543	0.1308	0.1963	0.2617	0.3271	0.3925
	$P_{dc-dc}$	42.34	74.09	127	169.4	211.7	254.1
Puissance et énergie : Sortie PV	$E_{pv}$	0.05115	0.1168	0.1824	0.2481	0.3137	0.3794
	$E_{pv}$	33.42	75.76	118.1	160.4	202.8	245.1

**3<sup>ème</sup> résultats : avec éclairement 1000**

Calcule des puissances et énergie à sortie de Hacheur et PV de claiement 1000. Avec ensemble photovoltaïque constitué de : 1 to 6 modules PV connectés en série avec éclairement 1000. Tableau (3.7)



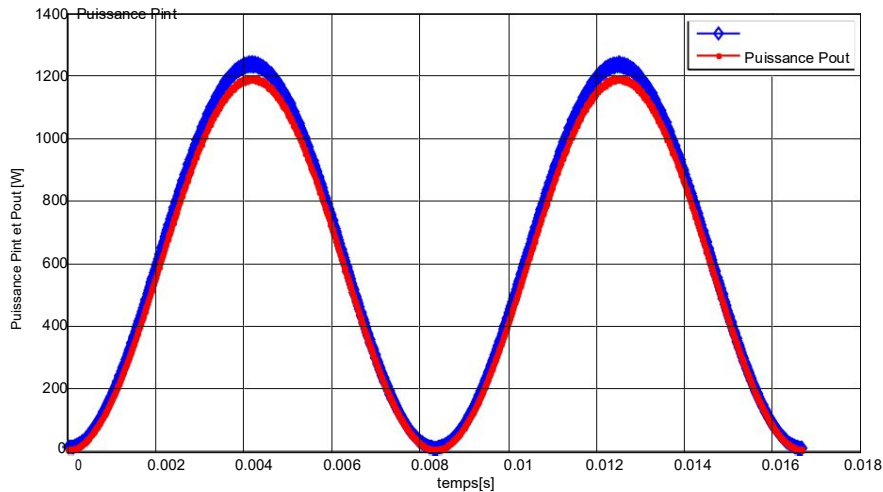
**Tableau 3.7 :** Calcule des puissances et énergie à sortie de Hacheur et PV de clairement 1000.

Nombre de cellule mode		1	2	3	4	5	6
Puissance	$P_{ideal}$	0.1419	0.4257	0.5676	0.7095	0.7095	0.8154
Puissance et énergie : Sortie DC-DC	$E_{dc-dc}$	0.1415	0.2829	0.4244	0.5638	0.7073	0.8487
	$P_{dc-dc}$	85.14	170.3	265.4	340.5	425.7	510.8
Puissance et énergie : Sortie PV	$E_{pv}$	0.113	0.2528	0.3942	0.5337	0.6771	0.8106
	$E_{pv}$	66.94	152.1	237.2	322.3	407.5	492.6

**B) Performance avec et son MPPT :**

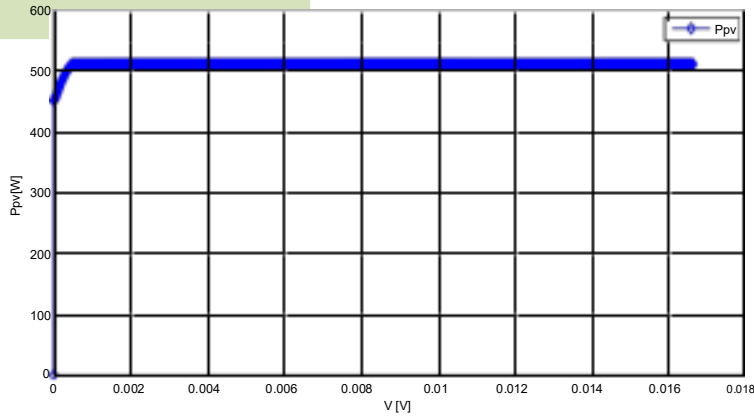
**1- Dans le cas avec de MPPT (0.00001) pour l'éclairement constant 10000**

Des résultats des courbes pour différents grandeurs sont illustrés sur les figures (3.30, 3.31, 3.32, et 3.33).

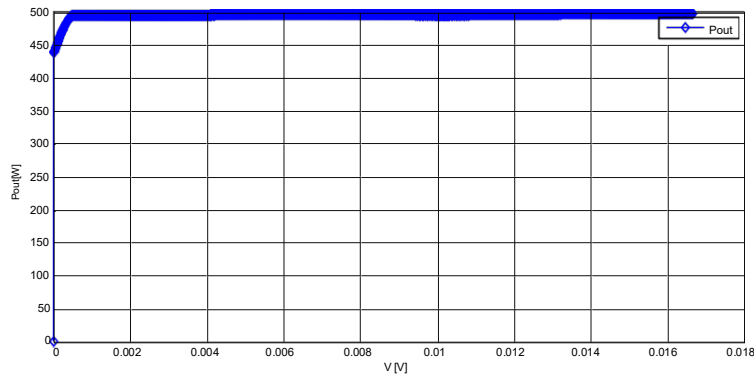


**Figure 3.30:** Résultats de simulation de la puissance Sortie et puissance entrée en fonction du temps

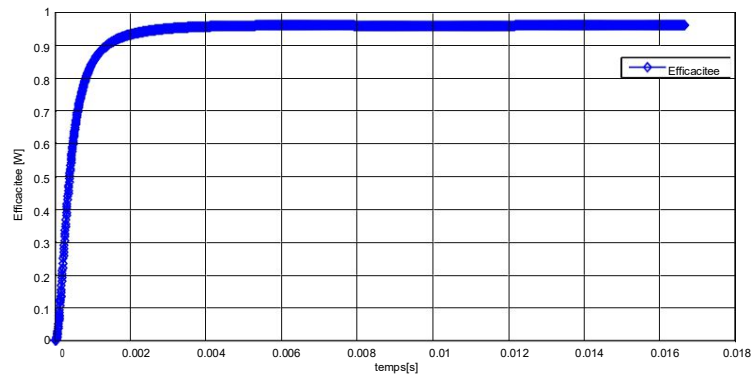
## Simulation et Performance d'impact Energie du Système Photovoltaïque



**Figure 3.31:** Résultats de simulation de la puissance  $P_{pv}$  en Fonction de la tension  $V$ .



**Figure 3.32:** Résultats de simulation de la puissance sortie  $P_{out}$  en Fonction de la tension  $V$ .

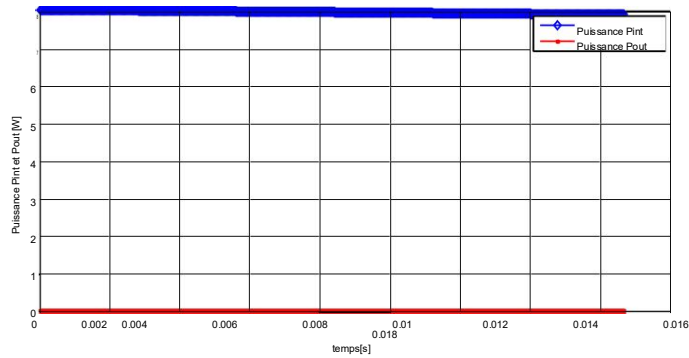


**Figure 3.33:** Résultats de simulation de la efficacité en Fonction du temps.

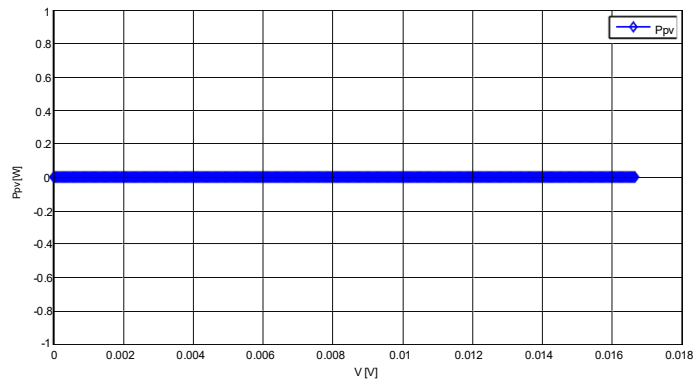


**2- Dans le cas sans de MPPT (0.00001) pour l'éclairement constant 10000**

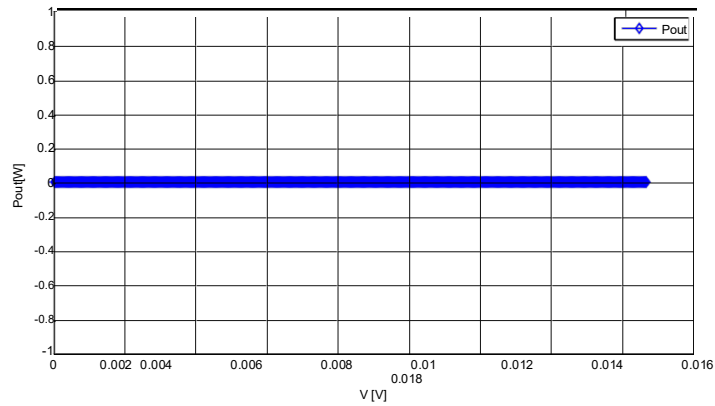
Des résultats des courbes pour différents grandeurs sont illustrés sur les figures (3.34, 3.35, 3.36, et 3.37).



**Figure 3.34:** Résultats de simulation de la puissance sortie et puissance entrée en Fonction du temps.

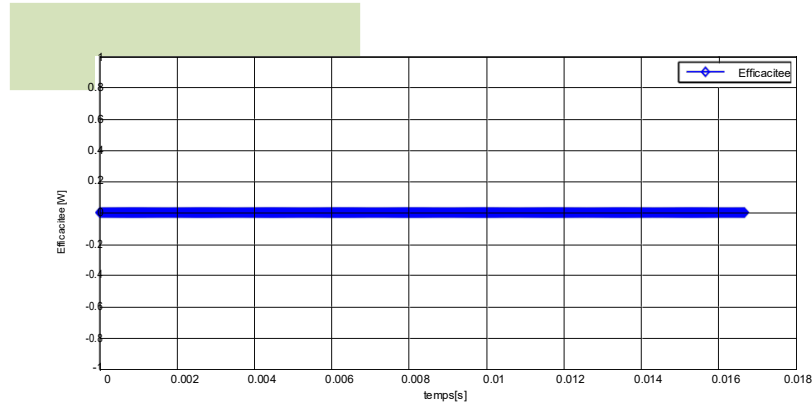


**Figure 3.35:** Résultats de simulation de la puissance  $P_{pv}$  en fonction de la tension  $V$ .



**Figure 3.36:** Résultats de simulation de la puissance sortie  $P_{out}$  en fonction de la tension  $V$ .

## Simulation et Performance d'impact Energie du Système Photovoltaïque



**Figure 3.37:** Résultats de simulation de la efficacité en fonction du temps.

L'énergie solaire des énergies renouvelable les plus importante, Aujourd'hui, un modèle de générateur photovoltaïque et modélisé sous Matlab/Simulink, résultat sans observé :

- La figure 3.30 montre les courbes de puissance (entre et sortie) pour l'éclairément constant. Pour un système PV avec régulateur MPPT, nous remarquons que la puissance diverge par rapport à la puissance du système PV sans régulateur MPPT de la figure (3.34).
- La figure (3.31), montre les courbes de puissance (pv) pour l'éclairément constant. Pour un système PV avec régulateur MPPT, nous remarquons que la puissance diverge par rapport à la puissance du système PV sans régulateur MPPT de la figure (3.35) .
- La figure (3.32), montre les courbes de puissance (sortie) pour l'éclairément constant. Pour un système PV avec régulateur MPPT, nous remarquons que la puissance diverge par rapport à la puissance du système PV sans régulateur MPPT de la figure (3.36) .
- La figure (3.33 et 3.37), montre les courbes de efficacité pour l'éclairément constant. Pour un système PV avec régulateur MPPT, nous remarquons que l'efficacité diverge par rapport à l'efficacité du système PV sans régulateur MPPT de la figure 3.36 .

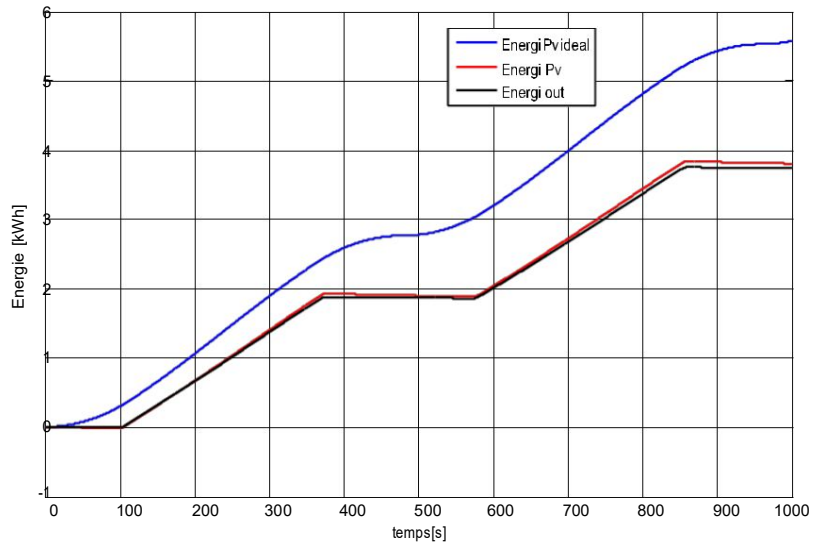
Pour un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT « perturbation et observation », nous remarquons que le system avec MPPT plus performance para port au système sons MPPT avec l'efficacité doit être augmentée et en régime permanent l'efficacité stabilisée autour de ( $\approx 0,95$  0.9 %).

**C) Simulation du système PV avec MPPT caractérisée par éclairnement variable**

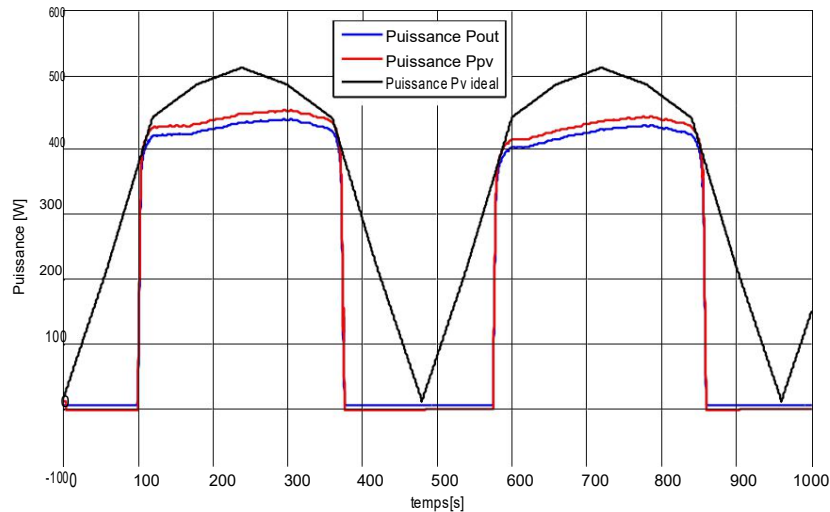
**L'objectif de cette section des simulations sont :**

La performance de système photovoltaïque caractérisée par éclairnement variable par convertisseur DC-DC avec commande MPPT, onduleur DC-AC connecté au réseau

Des résultats des courbes pour différents grandeurs sont illustrés sur les figures (3.38 et 3.39).



**Figure 3.38:** Résultats de simulation des énergies Sortie en fonction du temps.



**Figure 3.39:** Résultats de simulation des puissances En fonction du temps.

La figure (3.38) montre les résultats de simulation de la l'énergie (idéal, photovoltaïque et sortie) pour éclairement variable. Ainsi la figure (3.39) montre les résultats de simulation de la puissance (idéal, photovoltaïque et sortie) pour éclairement variable.

Pour un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT nous remarquons que la puissance de sortie suit la consigne appliquée au régulation, cette consigne noté  $P_{ideal}$  , pour les deux cas d'éclairément constant ou variable.

### **3.3 Conclusion :**

Dans ce chapitre, avons simulé et modélisé l'ensemble de la chaine de conversion de puissance sous l'environnement MATLAB /SIMULINK et l'algorithme de recherche du point de puissance maximale (MPPT) pour maximiser la puissance de la chaine photovoltaïque a été simulé par la suite nous avons simulé un les caractéristiques de notre module PV. Il est force le générateur GPV à travailler à son point de puissance maximale (MPP), induisant une amélioration d'efficacité du système photovoltaïque de conversion électrique.

*Conclusions Générales*  
*Et Perspectives*

### ***Conclusion générale***

Le travail qu'on a présenté dans ce mémoire 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 et les avantages et les inconvénients.

Nous avons étudiés à un convertisseur DC/DC de type 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. Le modèle du MPPT est basé sur un convertisseur DC /DC et un algorithme de recherche de point de puissance maximal. 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 :

- La thématique de ce étude Impacte d'énergie m'a apporté de nouvelles connaissances dans le domaine des énergies renouvelable et

en particulier l'énergie solaire qui est en grande évolution ces derniers temps.

- 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.
- Le commande MPPT adapte le point de fonctionnement du panneau PV à la charge et permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.

***Perspectives :***

Quelques perspectives nous recommandons la réalisation pratique et l'utilisation d'autres techniques de maximisation de puissances MPPT et d'ensoleillement Continuer sur ce qui est actuellement moderne le conception du PV etc....

*Référence*

*Bibliographiques*



***Référence Bibliographiques***

- [1] HAMDANI Abderrahmane & KACEM Brahim, « Etude et Simulation de Connexion d'une Centrale Photovoltaïque au Réseau Electrique Triphasé ». Mémoire de MASTER, Université Ahmed Draïa Adrar Faculté des Sciences et de la Technologie, Domaine : Sience Technique Filière : Electrotechnique Spécialité : Réseaux Electrique. 2017/2018.
- [2] DEBILI Narimene,« Eude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire de Magister en Electronique, Option: Matériaux et nanoélectronique ,Université des Frères Mentouri Constantine, 2014.
- [3] MEDDOUR Youcef & YAZI Zoubir, «Etude de raccordement d'un système photovoltaïque au réseau électrique», Mémoire de Master, Domaine : Sciences et technologies Filière : Génie électrique, Spécialité : Electrotechnique Industrielle, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015.
- [4] 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 Electriques. Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou. 2017.
- [5] A. R. F. Hananou. Etude et simulation d'un panneau solaire raccordé au réseau avec périphérique déstockage. Mémoire présente pour l'obtention du diplôme de Master académique, Université Kasdi Merbah, Ouargla-Algérie, Faculté des Sciences Appliquées, 2012.
- [6] Hamida Chohraoui & Ratiba Hadbi. « Modélisation Et Simulation d'un Système Photovoltaïque. Connecté Au Réseau » Master En 'Electrotechnique Option: Commande Des Machines Electriques Université E Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Faculté De Technologie. 2016.
- [7] <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-Photovoltaïque>.
- [8] J. Ferrieux, f. Forest, « alimentations a découpage convertisseurs a résonance: principes composants modélisation ». Paris, France: Dunod,

1999.

- [9] Y. Pankow, « Etude de l'intégration de la production décentralisé dans un réseau basse Tension Application au générateur photovoltaïque ». Thèse de doctorat en Electronique Electrotechnique et Automatique, l'école National supérieure d'Art et Métiers, Centre Nationale de Recherche Technologique de Lille décembre 2004.
- [10] Salima Alem-Boudjemline, « Réalisation et caractérisation des cellules Photovoltaïques Plastiques », thèse de doctorat Spécialité : Physique, Ecole Doctorale d'Angers, université d'Angers, 2004.
- [11] Hananou Fatiha & Rouabah Aicha, « Modélisation Et Simulation d'un Système Photovoltaïque » Mémoire de Master, Domaine : Sciences Et Technologies Filière : Electrotechnique Spécialité : Electrotechnique Industrielle. Université Kasdi Merbah Ouargla Faculté Des Sciences Appliquées. 2013/2014.
- [12] Helali KAMELIA, « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Étude comparative » Mémoire de Magister en Électrotechnique, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2012.
- [13] Pierre-Eymeric JANOLIN, « De l'effet photovoltaïque aux cellules photoélectriques » Publication, Techniques de l'Ingénieur, AF 6 240 .Paris (France). 2013.
- [14] Lahlah Salah, « Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incrémental Conductance (IncCond) et Hill Climbing (H.C) », Mémoire de Magister en Électrotechnique, Université de Batna, 2007.
- [15] Aboub Hania, « Commande d'un onduleur neuf niveaux, destiné aux fortes puissances PV », Mémoire de Magister En Électrotechnique, Option : Maitrise des Énergies, Université Hadj Lakhder – Batna 2014.
- [16] Boucli -Hacene Omar « Conception et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque Munie d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleur Gestion Energétique », Mémoire de Magister en automatique productique informatique, Université Abou-Bakr Belkaïd, Tlemcen, 2011.
- [17] R. Merahi, R. Chenni, M. Houbes, « Modélisation et simulation d'un module PV par Matlab » 10<sup>ème</sup> Séminaire International sur la Physique

- Énergétique Département Électrotechnique, Université de Badji Mokhtar Annaba, Journal of Scientifique Research N° 0 vol. 1, 2010.
- [18] Bahloul Abderrahmane Lakehal Reda, « Réalisation d'un système de pilotage d'un simulateur solaire : mesures-V et extraction des paramètres », Mémoire de master académique en science de la matière, Option : énergétique et matériaux, université de Tlemcen, Algérie, 2011.
- [19] Belkaïd Nora Akli Karima, « Thème Contrôle indirect d'un panneau solaire isolé du réseau »Mémoire de MASTER ACADEMIQUE Domaine : Sciences et Technologies, Filière : Electrotechnique Spécialité : Machines Electriques, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2018.
- [20] Stéphane VIGHETTI, «Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion », Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 24 septembre 2010.
- [21] A. MOHAMMEDI, « Contrôle par MPPT des systèmes de pompage photovoltaïque », Thèse de doctorat en commende et conversion d'énergie, Université A. Mira de Bejaia, 2015.
- [22] Frank Jackson : Planning and Installing Photovoltaic Systems Green Dragon Energy, A guide for installers, architects and engineers second edition Berlin October 2007.
- [23] Arnaud Sivert, « Panneaux Photovoltaïques Etude D'une Valise Solaire », IUT Génie Electrique & Informatique Industriel de Soissons. Iutenligne, le catalogue de ressources de l'enseignement technologique universitaire. 2019.
- [24] NAKOUL Zakia, « Optimisation D'une Centrale Solaire A Base D'un Générateur Pv -Application Aux Sites Tlemcen Et Bouzaréah -», Mémoire de magister. Spécialité: Ecole Doctorale Energies Renouvelables, Université Abou Bakr Belkaïd Tlemcen. 2010.
- [25] Benlahreche Houssein Eddine « Etude et optimisation d'un Système de pompage Photovoltaïque » Mémoire de master, Faculté Des sciences de L'ingénieur département Electrotechnique, Université Mentouri – Constantine, 2012.

- [26] K. Hellali « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque, Etude Comparative ». Mémoire De Magister En Electrotechnique, Option : Machines Electrique, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou ,2013/2014.
- [27] A. Labouret, M. Viloz, « Energie solaire photovoltaïque ». Dunod. 3<sup>ème</sup> édition.2006.
- [28] N. Debili. « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque ».Mémoire de magister, Université de Constantine I, Année 2014/2015.
- [29] Amar ouayache Mohamed, « contribution à l'optimisation d'une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque », doctorat en sciences en électrotechnique, option : Machines Electriques, Université Constantine 1, 2014
- [30] Jean CAILLAUD, « L'énergie Solaire Photovoltaïque ». Lycée des métiers de l'énergie, de la métallurgie et de la vente.  
  
[http://ww2.acpoitiers.fr/electrotechnique/IMG/pdf/energie\\_solaire\\_photovoltaique.pdf](http://ww2.acpoitiers.fr/electrotechnique/IMG/pdf/energie_solaire_photovoltaique.pdf). 20 Mars 2019.
- [31] GHAITAOUI Elmoulat & KHELIFI Houda, « Alimentation d'un Moteur Asynchrone à partir d'un Générateur Photovoltaïque »Mémoire de Master Filière : Electrotechnique Spécialité : Commande Electrique. Université Ahmed Draia ADRAR. 2019.
- [32] BELKADI Nora & AKLI Karima, « Contrôle indirect d'un panneau solaire isolé du réseau »Mémoire de MASTER Domaine : Sciences et Technologies Filière : Electrotechnique Spécialité : Machines Electriques. Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou. 2018.
- [33] Christian BISSIERES, « Conversion Statiques Des Energies, Physique Appliquée », <http://www.cbissprof.free.fr>.
- [34] Dr.F.Bouchafaa, « Cours Électronique de puissance », [http : //www.usthb.com](http://www.usthb.com), 2008/2009.

- [35] Emmanuel PINAULT-BIGEARD, Cours : Convertisseurs Statiques. CPGE PTSI/PT - Sciences Industrielles De l'Ingenieur. Lycée Jean Zay - Thiers. S2i. Pinault-Bigeard. Com.
- [36] Yacini Lounis. « Etude Et Simulation D'un Convertisseur Electrique Interconnecte Au Réseau Conventiennel » Mémoire De Master Professionnel. Filière : Génie électrique Spécialité: Automatique et Informatique Industrielles Faculté Du Génie Electrique Et D'informatique. Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou. 2015/2016.
- [37] C. bernard, C. sebrao, O. bernardlaval, C.vaudouer «Gestion énergétique des panneaux photovoltaïques» université de Sfax école nationale d'ingénieurs de Sfax, 2008-2009.
- [38] Boucheritte Wafa, « Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau », Mémoire de Magister en Électrotechnique, Option Énergies renouvelables, Université Mohamed Khider, Biskra, 2013.
- [39] NDIAYE Papa Amadou et KAWTHER Achari « Production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master Académique. Domaine : Sciences et Technologie, Filière: Électro mécanique, Spécialité: Electromécanique, Université 8 Mai 1945 – Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie. 2019.
- [40] A.P. Malvino, D.J. Bates, Électronique Principales, (McGraw-Hill, 2016).
- [41] L. Lasne, Electronique de puissance, (Dunod, 2015).
- [42] Zerdoudi A., Chenni R., " Etude De L'influence Des Différents Paramètres Sur Un Module Photovoltaïque ", Sciences & Technologie A – N°41, Juin 2015, 49-54.
- [43] Benhaddouche Nesrine Fatim, « La Commande D'un Système Photovoltaïque D'un Satellite », Mémoire de Master en Automatique : contrôle de processus, Université Abou Bekr Belkaïd -Tlemcen, 2011.
- [44] Meddah M., Bourahla M., Bouchetata N., " Synthèse des convertisseurs statiques dc/ac pour les systèmes photovoltaïques. Revue des Energies Renouvelables, ICESD'11 Adrar 2011.

- [45] ABID Ayoub & BECHLAGHEM Yassine, « Etude et dimensionnement d'un convertisseur SEPIC pour une application photovoltaïque », Mémoire de Master académique, spécialité électrotechnique, option : Réseaux électriques et réseaux électriques intelligents, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 2017. 98.
- [46] 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, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, 2015.
- [47] NETTARI Yakoub, « Commandes robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Ferhat Abbas Sétif, 2014.
- [48] AIT-CHEIKH, SALAH MOHAMED, « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », Thèse d'État : Électronique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2007.
- [49] L. Protin, « Convertisseurs photovoltaïques », Technique de l'ingénieur, traité génie Électrique 2001.
- [50] Méchalikhe Med Nadjib & Hamada Charaf Eddine, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau », Mémoire de Master Académique, Domaine : sciences et technologies Filière : Génie électrique, Spécialité: Machine électrique et électronique de puissance, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2013.
- [51] Ionel Vechiu, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de doctorat, Discipline : Electronique, Electrotechnique et Automatique Spécialité : Génie Electrique l'université du havre, Paris, 2005.
- [52] Othmane BENSEDDIK & Fathi DJALOU, « Etude et optimisation d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master, Spécialité : Génie électrique et électronique, Option : Automatique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2012.

- [53] 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.
- [54] Meddah Mohamed, « Synthèse des convertisseurs statique DC/DC/AC pour les systèmes photovoltaïques : Etudes et Simulation », mémoire de Magister Spécialité : Génie Electrique, Ecole doctorale: commande industriel des entrainements, Université de science et de technologies d'Oran.
- [55] Abderrahim Ioulou, « Lectronique De Puissance Et Commande Dans Le Système Photovoltaïque Connectés Au Réseau» Mémoire De Master, Spécialité : instrumentation et contrôle industrie DOMAINE : Science et technologie, Filière : Electronique, Université badji mokhtar –Annaba. 2017.
- [56] ECEN497/5797 intro to Power Electronics [ece.coloradoedu/NECEH5797](http://ece.coloradoedu/NECEH5797).



# *Résumés*

### Résumé

Dans ces dernières années de la l'énergie renouvelable c'est développé largement ainsi que photovoltaïque d'un modèle compréhensible de production d'électricité à partir de l'énergie solaire photovoltaïque. Cette modèle contient une représentation détaillée des principales composantes du système qui sont le photovoltaïque, les convertisseurs et l'onduleur côté réseau. Un choix et un contrôle adéquat de différents types de convertisseurs doit être développé dans le but d'extraire le maximum de la puissance du générateur photovoltaïque. L'onduleur doit transférer l'énergie produite dans le réseau en gardant la tension alternative constante. La production d'énergie est ensuite calculée et contrôle de la qualité de la puissance pour l'onduleur. Ensuite faire fonctionner le réseau photovoltaïque au point de puissance maximum *MPP* dans toutes les conditions et générer un courant de sortie en courant alternatif en phase avec la tension du réseau d'alimentation secteur. En fin, le simulateur offre un rendement de conversion de puissance proche de 100%.

**Mots-clés** : Energie renouvelable, Photovoltaïque, convertisseurs, onduleur, point de puissance maximum *MPP*.

### Abstract

In recent years the renewable energy has developed widely as well as photovoltaic a comprehensible model of electricity production from solar photovoltaic energy. This model contains a detailed representation of the main components of the system which are the PV photovoltaic panel, the converters and the grid side inverter. An adequate choice and control of different types of converters must be developed in order to extract the maximum power from the photovoltaic generator. The inverter must transfer the energy produced into the grid while keeping the AC voltage constant. The energy production is then calculated and quality control of the power for the inverter. Then operate the photovoltaic network at the maximum power point *MPP* under all conditions and generate an alternating current output current in phase with the voltage of the mains supply network. Finally, the simulator offers a power conversion efficiency close to 100%.

**Keywords:** Renewable energy, Photovoltaics, converters, inverter, maximum power point *MPP*.

### المخلص :

في السنوات الأخيرة ، تم تطوير الطاقة المتجددة على نطاق واسع وكذلك الخلايا الكهروضوئية نموذج مفهوم لإنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية الكهروضوئية. يحتوي هذا النموذج على تمثيل مفصل للمكونات الرئيسية للنظام وهي اللوحة الكهروضوئية PV والمحولات والعاكس من جانب الشبكة. يجب تطوير الاختيار والتحكم المناسبين لأنواع مختلفة من المحولات من أجل استخراج الطاقة القصوى من المولد الكهروضوئي. يجب أن يقوم العاكس بنقل الطاقة المنتجة من الوحدات الكهروضوئية إلى الشبكة ، مع الحفاظ على جهد التيار المتردد ثابتاً. ثم يتم حساب إنتاج الطاقة ومراقبة جودة الطاقة للعاكس. ثم قم بتشغيل الشبكة الكهروضوئية في أقصى نقطة طاقة *MPP* في جميع الظروف وتوليد تيار إخراج التيار المتردد في المرحلة مع جهد شبكة التيار الكهربائي. أخيراً ، يقدم جهاز المحاكاة كفاءة تحويل طاقة قريبة من 100 %.

**الكلمات المفتاحية** : الطاقة المتجددة ، الخلايا الكهروضوئية ، المحولات ، إنتاج الطاقة ، أقصى نقطة طاقة (*MPP*)