



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : Technologie

DEPARTEMENT : Electrotechnique

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par :

Gahgouhi Azzeddine

DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : AUTOMATIQUE

OPTION : AUTOMATIQUE ET SYSTEME

Thème

**Contribution à la commande d'un
système photovoltaïque**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
Mr Birame M'hammed		Président
Mr Birane mouhoub		Examineur
Mr Belkheiri ahmed		Rapporteur

Promotion : 2024- 2025

Résumé :

Ce travail présente une étude approfondie sur les systèmes photovoltaïques et les systèmes photovoltaïques raccordé au réseau. Il aborde les principes de base tels que l'énergie solaire, le rayonnement solaire et l'effet photovoltaïque. Il explique le fonctionnement des cellules photovoltaïques, les associations de cellules et le comportement des générateurs photovoltaïques en fonction de l'éclairement et de la température. Le travail explore également les différents types de connexions des systèmes photovoltaïques et les batteries d'accumulateurs. De plus, il présente les convertisseurs statiques tels que les hacheurs et les onduleurs, ainsi que les stratégies de commande associées. Enfin, il inclut des simulations et des évaluations des performances du système photovoltaïque dans diverses conditions environnementales.

Mots clés : PV, MPPT, Boost, onduleur, filtre, commande DQ, réseau électrique

ملخص: يتناول البحث موضوع النظم الكهروضوئية والنظم الكهروضوئية المتصلة بالشبكة. ويقدم مقدمة عامة تشمل مفهوم الطاقة الشمسية والإشعاع الشمسي وتأثير الخلايا الشمسية ومكوناتها ونماذج الدوائر المعادلة لها. ويتطرق أيضاً إلى توصيل الخلايا الشمسية وتكوين المولدات الكهروضوئية واختيار البطاريات وتوصيل النظم الكهروضوئية. ويتناول البحث أيضاً المحولات الثابتة وطرق التحكم فيها ويشمل المحولات التي تحول التيار المستمر إلى التيار المستمر والمحولات التي تحول التيار المستمر إلى التيار المتردد، وكذلك استراتيجيات التحكم والتنظيم لهذه المحولات. وأخيراً، يقدم البحث محاكاة وتقييم النتائج المتعلقة بأداء النظام الكهروضوئي في ظروف بيئية مختلفة وتأثير تغير الإضاءة والحرارة. في الختام، يتم تقديم استنتاجات البحث والاستنتاجات العامة للدراسة.

الكلمات المفتاحية: الواح كهروضوئية، تتبع نقطة القدرة القصوى، محول رفع الجهد، عاكس، مرشح، تحكم dq، شبكة كهربائية

Abstract:

The research focuses on photovoltaic systems and the grid connected photovoltaic systems. and provides a general introduction to solar energy, solar radiation, the photovoltaic effect, and the different technologies of solar cells. It also discusses the behavior of photovoltaic generators, the effects of irradiance and temperature, shading, and various connections of photovoltaic systems and accumulator batteries. Additionally, it covers static converters and their control strategies, including DC/DC converters and DC/AC inverters. The research concludes with simulations and evaluations of the photovoltaic system's performance under different environmental conditions. Finally, general conclusions are presented.

Key words : PV, MPPT, Boost, Inverter, Filter, DQ control, Electric grid

Remerciements

Tout d'abord, Louange à notre Seigneur "ALLAH" qui m'a donné la force, la santé, la volonté, le courage et la patience, des qualités qui m'ont été précieuses tout au long de mon parcours. Louange à mon créateur qui m'a incité à acquérir le savoir.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à M. Belkheiri Ahmed pour l'encadrement qu'il m'a assuré, ainsi que pour ses précieux et judicieux conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de ce projet. Je le remercie également pour la confiance qu'il a su m'accorder jusqu'à la dernière minute.

Je n'oublie pas l'ensemble des enseignants du département d'électrotechnique, pour leur enseignement de qualité qui m'a permis d'acquérir des connaissances.

Je tiens également à remercier les membres du jury pour avoir accepté d'examiner et de juger ce travail, et pour leurs remarques pertinentes qui ont contribué à son amélioration.

Enfin, je tiens à remercier vivement ma chère famille pour leurs encouragements et tous ceux qui nous aident de près ou de loin dans tout le long de notre parcours.

Dédicace

Je dédie ce travail :

À ma chère mère

Pour son grand amour, ses sacrifices et toute l'affection qu'elle m'a
toujours offerte.

À mon cher père

Pour sa patience et ses considérables sacrifices pour me parvenir à ce
niveau

À ma chère sœur

À mes chers frères *Zakaria* et *Mahdi*

À mes grands-parents, mes oncles, mes tantes, mes cousins, et toute ma
grande famille

Pour tous mes ami(e)s

Et toute personne qui a participé de près ou de loin à mettre en œuvre

Ce modeste travail

...Merci.

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1 Spectre du rayonnement solaire.....	5
Figure 1.2 Composantes du rayonnement solaire au sol.....	6
Figure 2.3 Représentation schématique de l'effet photovoltaïque.....	7
Figure 1.4 Structure basique d'une cellule solaire.....	8
Figure 1.5 Représentation schématique d'une cellule photovoltaïque.....	9
Figure 1.6 différentes technologies des cellules photovoltaïques.....	10
Figure 1.7 Schéma du circuit équivalent simplifié d'une cellule photovoltaïque.....	11
Figure 1.8 Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.....	12
Figure 1.9 Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série.....	16
Figure 1.10 Caractéristiques résultant d'un groupement de Np cellules en parallèle.....	16
Figure 1.11 Association mixte des modules.....	17
Figure 1.12 Caractéristiques I-V pour l'association mixte.....	17
Figure 1.13 (a) Architecture Classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protection (b) Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode by-pass.....	18
Figure 1.14 Courbes I(V) sous diverses intensités de rayonnement d'une cellule.....	19
Figure 1.15 Effet de la température sur la caractéristique I-V.....	20
Figure 1.16 Caractéristique I-V est P-V des Cellules PV avec et son ombrage.....	21
Figure 1.17 Structure d'un système PV autonome.....	22
Figure 1.18 Structure d'un système hybride.....	22
Figure 1.19 Structure d'un système photovoltaïque connecté au réseau.....	23
Figure 1.20 Installation photovoltaïque relié au réseau sans batterie.....	25
Figure 1.21 Installation photovoltaïque relié au réseau avec batterie.....	26
Figure 1.22 Schéma synoptique de la structure à convertisseur unique.....	27
Figure 1.23 Schéma de la structure avec hacheur et onduleur.....	27

Chapitre 2

Figure 2.1 Différents types de convertisseurs statiques.....	33
Figure 2.2 Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	33
Figure 2.3 Schéma d'un hacheur Buck (abaisseur).....	34

Figure 2.4 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Buck.....	35
Figure 2.5 Schéma d'un hacheur Boost (élevateur).....	36
Figure 2.6 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Boost.....	37
Figure 2.7 Schéma électrique d'un hacheur buck- boost.....	37
Figure 2.8 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Buck-Boost.....	38
Figure 2.9 Schéma bloc de simulation du convertisseur Boost.....	40
Figure 2.10 Tension de sortie du convertisseur Boost.....	40
Figure 2.11 Courant de sortie du convertisseur Boost.....	41
Figure 2.12 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec une commande MPPT...	42
Figure 2.13 Schéma de principe du convertisseur MPPT.....	43
Figure 2.14 Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation P&O.....	44
Figure 2.15 Schéma de simulation de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O).....	45
Figure 2.16 symbole de de convertisseurs DC/AC monophasé et triphasé.....	46
Figure 2.17 Onduleurs autonomes.....	47
Figure 2.18 Les onduleurs interconnectés au réseau.....	48
Figure 2.19 Onduleurs solaires pompage.....	48
Figure 2.20 Structure d'onduleur monophasé.....	49
Figure 2.21 Structures d'onduleurs triphasé.....	49
Figure 2.22 MLI à porteuse en dents de scie.....	50
Figure 2.23 Schéma du filtre.....	51
Figure 2.24 Schéma de la boucle interne du courant.....	53
Figure 2.25 Schéma de la boucle externe de la tension.....	54
Figure 2.26 La génération de signal de référence utilisant la transformation d-q.....	55

Chapitre 3

Figure 3.1 Schéma synoptique de l'installation.....	58
Figure 3.2 Schéma de la simulation du système photovoltaïque.....	59
Figure 3.3 Caractéristiques $I = f(V)$ du panneau PV ($T=25^{\circ}\text{C}$, insolation= $1000\text{w}/\text{m}^2$).....	60
Figure 3.4 Caractéristiques $P = f(V)$ du panneau PV ($T=25^{\circ}\text{C}$, insolation= $1000\text{W}/\text{m}^2$)	60
Figure 3.5 Caractéristiques Courant-Tension pour différents éclairagements.....	62
Figure 3.6 Caractéristiques Puissance Tension pour différents éclairagements.....	62
Figure 3.7 Caractéristiques Courant-Tension pour différentes températures.....	62
Figure 3.8 Caractéristiques Puissance–Tension pour différentes températures.....	63
Figure 3.9 schéma de simulation d'Hacheur boost avec la commande MPPT.....	63

Figure 3.10 modèle 'MATLAB SIMULINK' onduleur triphasé.....	64
Figure 3.11 modèle 'MATLAB SIMULINK' de la commande d'onduleur.....	64
Figure 3.12 Réseau électrique.....	65
Figure 3.13 Caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ des panneaux PV($T=25^{\circ}\text{C}/45^{\circ}\text{C}$, insolation= $1000\text{W}/\text{m}^2$).....	66
Figure 3.14 Tension de sortie du GPV dans STC.....	66
Figure 3.15 courant de sortie du GPV dans STC.....	67
Figure 3.16 puissance de sortie du GPV dans STC.....	67
Figure 3.17 Tension de sortie du hacheur boost dans STC.....	68
Figure 3.18 Tension de sortie d'onduleur avant filtrage dans STC.....	69
Figure 3.19 Tension de sortie de réseau dans STC.....	69
Figure 3.20 Courant de sortie de la charge dans STC.....	70
Figure 3.21 Puissance de sortie dans STC.....	70
Figure 3.22 la puissance réactive dans STC.....	71
Figure 3.23 Variation de l'éclairement en fonction du temps (profil lent).....	72
Figure 3.24 Tension de sortie du GPV pour un éclairement variable (profile lent).....	72
Figure 3.25 Courant de sortie du GPV pour un éclairement variable (profile lent).....	73
Figure 3.26 puissance de sortie du GPV pour un éclairement variable (profile lent).....	73
Figure 3.27 Tension de sortie du convertisseur boost pour un éclairement variable (profile lent)	74
Figure 3.28 Tension de sortie du convertisseur DC/AC pour un éclairement variable (profile lent)	74
Figure 3.29 Tension de sortie de réseau pour un éclairement variable (profile lent).....	75
Figure 3.30 Courant de sortie de réseau pour un éclairement variable (profile lent).....	75
Figure 3.31 Puissance de sortie de la charge pour un éclairement variable (profile lent).....	76
Figure 3.32 Puissance réactive pour un éclairement variable (profile lent).....	76
Figure 3.33 Variation de température en fonction du temps (profil lent).....	77
Figure 3.34 Tension de sortie du GPV pour un température variable (profile lent).....	78
Figure 3.35 Courant de sortie du GPV pour un température variable (profile lent).....	78
Figure 3.36 Puissance de sortie du GPV pour un température variable (profile lent).....	79
Figure 3.37 Tension de sortie de hacheur boost pour un température variable (profile lent).....	79

Figure 3.38 Tension de sortie du convertisseur DC/AC pour une température variable (profile lent).....	80
Figure 3.39 Tension de sortie de réseau pour une température variable (profile lent).....	81
Figure 3.40 Courant de sortie de réseau pour une température variable (profile lent).....	81
Figure 3.41 Puissance de sortie de la charge pour une température variable (profile lent).....	82
Figure 3.42 Puissance réactive pour une température variable (profile lent).....	82

Liste de tableaux

Tableau 2.1 Caractéristiques des commandes par MLI.....	51
Tableau 3.1 Paramètres du module PV KC200GT aux conditions standards	60
Tableau 3.2 les valeurs des composantes d’hacheur boost.....	63
Tableau 3.3 les paramètres de filtre LCL.....	64

Liste des abréviations

PV: Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

FF: Facteur de forme.

N_s : Nombre de cellules en série.

N_p : Nombre de cellules en parallèle.

MPP : Maximum power point

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O: Perturbation et Observation.

DC: Courant Continu (Direct Current).

AC: Courant Alternatif (Alternative Current).

A/H: Ampère Heure.

PI : Proportionnel Integral

MLI : Modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation).

STC : Standard Test Conditions.

Symboles

h : Constante de Planck ($6.62.10^{-34}$ j.s).
E_g : Energie de la bande interdite (eV).
S : Surface du module photovoltaïque (m²).
E : Eclairement (W/m²).
I_{ph} : Le photo-courant (A).
I_{sat} : Courant de saturation (A).
R_p : Résistances parallèle shunt. (Ω)
R_S : Résistance série (Ω).
T_c : Température de jonction (°K).
G : L'éclairement de référence (1000 W/m²).
T_{ref} : La température de référence (298 °K).
a:Le facteur d'idéalité de la jonction
I_{cc} : Le courant de court-circuit (A).
V_{co} : La tension de circuit ouvert (V).
FF : Facteur de forme.
N_s : Nombre de modules dans le panneau en série.
N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.
P_{max} : La puissance maximale produite PV (W).
V_{max} : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).
 λ : Longueur d'onde,
I : courant fourni par la cellule.
C: Célérité de la lumière
I₀: Courant de saturation inverse de la diode.
q: Charge de l'électron= $1,60217646 \times 10^{-19}$ C.
k:Constante de Boltzmann = $1,3806503 \times 10^{-23}$ J/K.
V_t : potentielle thermodynamique
T: Température en kelvin
V : tension aux bornes de cellule
I_{scnp}: La somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle.
V_{ocnp}: Tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.
 α : le rapport cyclique.
V_{dc}:Tension continue.(V)
V_{dc}*: Vecteur de tension continue de référence (V)
T_{sc}: période d'échantillonnage de l'onduleur.(s)
V_{ref}: Vecteur Tension de référence.(V)
I_s*: Vecteur de courant de référence (A)
V_q,V_d: composantes du vecteur dans le plan d-q.
I_L: Courant de l'inductance (A)
I_c:Courant de Condensateur (A)
V_L:tension de l'inductance (V)
V_c:tension de condensateur(V)
L:Inductance (H)
C: Condensateur (F) **F_e**: Fréquence(Hz) **T**:temps (s)
P_c: puissance de charge (W)
R: résistance (Ω)
F_s:Fréquence de commutation (rad/s)
T_s:temps de commutation(s)

Table des matières

Résumé :	i
<i>Remerciements</i>	<i>ii</i>
<i>Dédicace</i>	<i>iii</i>
Liste des figures	iv
Liste de tableaux	viii
Liste des abréviations	ix
Symboles	x
Introduction générale.....	1
1.1 Introduction :.....	4
1.2 L'énergie solaire :	4
1.2.1 Gisement solaire :	4
1.2.2 Le rayonnement solaire :	4
1.2.2.1 Rayonnement direct	5
1.2.2.2 Rayonnement réfléchi ou un albédo :	5
1.2.2.3 Le rayonnement global :	5
1.3 Durée d'insolation	6
1.4 L'effet photovoltaïque :	6
1.5 La cellule photovoltaïque (photopile) :	7
1.5.1 Principe De Fonctionnement.....	8
1.5.2 Les différentes technologies des cellules photovoltaïques	8
1.5.3 Différentes technologies des cellules photovoltaïques.....	9
1.5.4 Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire :	11
1.5.4.1 Générateur photovoltaïque idéal.....	11
1.5.4.2 Paramètre des cellules photovoltaïques :	14
1.5.4.2.1 Courant de court-circuit :	14
1.5.4.2.2 Facteur de forme	15
1.6 Générateur photovoltaïque.....	15
1.7 Association des cellules.....	15
1.7.1 Association en série	15
1.7.2 Association en parallèle :	16
1.7.3 Association mixte (série parallèle).....	17

1.7.4	Les caractéristiques et les problèmes potentiels des générateurs solaires. .	18
1.8	Comportement d'un générateur photovoltaïque.....	19
1.8.1	Influence de l'éclairement	19
1.8.2	Influence de la température.....	19
1.9	L'effet de l'ombrage :	20
1.10	Les différentes connexions des systèmes photovoltaïques.....	21
1.10.1	Les systèmes autonomes	22
1.10.2	Les systèmes Hybrides.....	22
1.10.3	Les systèmes raccordés au réseau	23
1.10.3.1	Vision sur les réseaux électrique	23
1.10.3.1.1	Niveaux de tensions des réseaux	23
1.10.3.1.2	Les postes électriques.....	23
1.10.3.1.3	Les lignes électriques	24
1.10.3.2	Les centrales solaire ou photovoltaïque	24
1.10.3.2.1	Classements des centrales photovoltaïques connectées au réseau .	24
1.10.3.3	Vision sur les systèmes photovoltaïque raccordé au réseau	24
1.10.3.3.1	Éléments constitutifs d'une installation PV connecté au réseau	24
1.10.3.3.2	Les systèmes PV connectés au réseau sans stockage	25
1.10.3.3.3	Les systèmes PV connectés au réseau avec batterie de stockage....	25
1.10.3.4	Types de structure d'un système PV	26
1.10.3.4.1	Structure PV connectée directement au réseau	26
1.10.3.4.2	Structure avec hacheur et onduleur.....	27
1.11	Batteries d'accumulateurs :	28
1.11.1	La capacité.....	28
1.11.2	Rendement faradique (rendement en tension) :	28
1.11.3	Profondeur de décharge maximum :	28
1.11.4	Durée de vie :	29
1.11.5	Taux d'autodécharge :	29
1.11.6	Coût :	29
1.12	Conclusion :	30
2.1	Introduction	32
2.2	Convertisseurs statiques	32
2.2.1	Convertisseurs continu-continu (hacheurs) :	33
2.2.1.1	Type des hacheurs :	34
2.2.1.1.1	Hacheur Buck(abaisseur).....	34

2.2.1.1.2	Hacheur élévateur (Boost).....	36
2.2.1.1.3	Hacheur à stockage inductif ou BUCK-BOOST.....	37
2.2.1.2	Le choix de convertisseur DC/DC	38
2.2.1.2.1	Détermination des paramètres du hacheur Boost:	39
2.2.1.3	Simulation du hacheur Boost.....	40
•	Résultats de la simulation :	40
•	Interprétation des résultats :	41
2.2.1.4	Commande MPPT.....	42
2.2.1.4.1	Principe de la MPPT.....	42
2.2.1.4.2	Les différentes techniques de MPPT.....	43
2.2.1.4.3	Méthode de perturbation et d'observation (P&O)	43
2.2.2	Convertisseur DC/AC (onduleur)	45
2.2.2.1	Choix de convertisseur DC/AC	46
2.2.2.2	Les onduleurs solaires.....	47
2.2.2.2.1	Types d'onduleurs solaires.....	47
2.2.2.2.2	Les onduleurs Autonomes	47
2.2.2.2.3	Les onduleurs interconnectés au réseau.....	48
2.2.2.2.4	Les onduleurs de pompage	48
2.2.2.3	Les structures de l'onduleurs	49
2.2.2.4	La Modulation de largeur d'impulsion MLI	50
2.2.2.4.1	Principe de la modulation de largeur d'impulsion	50
2.2.3	Filtrage	51
2.2.4	La stratégie de commande DQ.....	52
2.2.5	Régulation des courants des boucles internes	52
2.2.6	Boucle de régulation de tension du bus continu.....	53
2.2.7	La découplage Dq pour tension et courant.....	54
2.3	Conclusion	56
3.1	Introduction.....	58
3.2	Description du système photovoltaïque global :	58
3.2.1	Le panneau photovoltaïque :	59
3.2.1.1	Les caractéristiques électriques du panneau PV :	59
3.2.1.2	Fonctionnement dans des conditions environnementales stables :	61
3.2.1.3	Résultats de la simulation a la sortie du GPV :	61
3.2.1.3.1	L'influence de l'éclairement solaire sur le fonctionnement du panneau PV	61

3.2.1.3.2	L'influence de la température sur le fonctionnement du panneau PV	62
3.2.2	Le hacheur boost :	63
3.2.3	Onduleur triphasé :	64
3.2.4	Réseau électrique :	65
3.3	Etude de notre projet :	65
3.4	Fonctionnement dans des conditions environnementales standard STC :	66
3.4.1.1.1	Résultats de simulation à la sortie du GPV et convertisseur DC/DC :	66
3.4.1.1.2	Résultats de simulation à la sortie du convertisseur DC/AC :	69
3.5	Fonctionnement dans des conditions environnementales variables :	71
3.5.1	Eclairement variable et température constante :	71
3.5.1.1.1	Résultats de simulation à la sortie du GPV et convertisseur DC/DC :	72
3.5.1.1.2	Résultats de simulation à la sortie du convertisseur DC/AC :	74
3.5.2	Eclairement constant et température variable :	77
3.5.2.1	Profil lent :	77
3.5.2.2	Résultats de simulation à la sortie du GPV et convertisseur DC/DC :	78
3.5.2.2.1	Résultats de simulation à la sortie du convertisseur DC/AC :	80
3.6	Conclusion :	83
	Conclusion générale	85
	Références bibliographiques	87

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie solaire est devenue une source d'énergie de plus en plus importante et prometteuse pour répondre à la demande croissante en électricité et pour réduire l'impact environnemental des sources d'énergie fossiles. Les systèmes photovoltaïques jouent un rôle clé dans la conversion de l'énergie solaire en électricité. Cependant, malgré leur potentiel, ces systèmes présentent des limitations en termes de performance, d'efficacité et de coûts, ce qui entrave leur adoption à grande échelle. Par conséquent, il est crucial d'améliorer les performances et l'efficacité des installations de systèmes photovoltaïques afin de maximiser leur contribution à l'approvisionnement en énergie renouvelable.

Dans ce contexte, l'étude et la simulation de ces systèmes revêtent une importance capitale. Elles permettent d'évaluer leur performance, d'identifier les facteurs clés qui influent sur leur efficacité et de proposer des améliorations pour optimiser leur fonctionnement. Les systèmes photovoltaïques convertissent l'énergie solaire en énergie électrique en utilisant un champ de modules photovoltaïques et un ensemble de composants électroniques qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

Le présent mémoire se concentre sur l'analyse de la modélisation et de la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque couplé à un convertisseur DC-DC (hacheur BOOST) piloté par une commande numérique (commande MPPT : perturbation et observation et commande MLI). Ce système permet de maximiser la puissance fournie par le générateur photovoltaïque. De plus, le système est connecté au réseau et couplé avec un onduleur triphasé adapté par une commande (MLI) qui assure la régulation de la tension et du courant à l'aide d'un régulateur PI et d'une référence DQ.

L'objectif de ce travail est d'étudier, par le biais de simulations réalisées sous MATLAB, un système photovoltaïque, en utilisant des convertisseurs statiques, ainsi que la commande adéquate des gâchettes. Cette problématique sera traitée à travers trois chapitres distincts.

Le premier chapitre aborde la modélisation du générateur photovoltaïque, en décrivant la structure et le fonctionnement des cellules et des générateurs photovoltaïques, ainsi que l'influence des conditions météorologiques sur les caractéristiques électriques de ces générateurs.

Le deuxième chapitre se concentre sur l'étude des différents types de convertisseurs et de

leurs commandes. Dans un premier temps, nous examinerons les convertisseurs DC/DC et les algorithmes les plus couramment utilisés pour la poursuite du point de puissance maximale. Nous étudierons trois types de convertisseurs DC/DC : le hacheur abaisseur (Buck), le hacheur élévateur (Boost) et le hacheur abaisseur-élévateur (Buck-Boost). Nous nous pencherons également sur la méthode MPPT, plus précisément la méthode Perturbation et Observation (P&O), et nous effectuerons une simulation du comportement du panneau photovoltaïque en utilisant cette technique.

Dans un deuxième temps, nous aborderons les convertisseurs DC/AC, notamment les onduleurs solaires, en réalisant la modélisation et le dimensionnement des régulateurs de courant et de tension. Nous expliquerons également la commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) utilisée dans ces convertisseurs.

Le troisième et dernier chapitre présentera notre projet d'un système photovoltaïque de 5KW. Nous effectuerons une simulation complète du système photovoltaïque, en considérant les conditions standard de test (STC) ainsi que les variations environnementales. Enfin, nous présenterons une conclusion générale et des commentaires sur les résultats obtenus.

Ce mémoire vise donc à approfondir les connaissances sur les systèmes photovoltaïques en réalisant une étude approfondie et des simulations détaillées. Nous espérons ainsi contribuer à l'amélioration des performances, de l'efficacité et de la rentabilité de ces systèmes, en vue de favoriser leur adoption à grande échelle dans le cadre de la transition énergétique vers des sources d'énergie plus durables et respectueuses de l'environnement.

**Généralités sur les systèmes
photovoltaïque**

1.1 Introduction :

Les systèmes photovoltaïques sont des systèmes électriques utilisant la technologie photovoltaïque pour transformer la lumière en électricité via l'effet photovoltaïque. Ce mécanisme repose sur la production de charges électriques dans des matériaux semi-conducteurs comme le silicium lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Les systèmes photovoltaïques peuvent être installés de manière autonome ou intégrés à des réseaux électriques existants. Ils constituent une méthode efficace pour produire de l'énergie propre et renouvelable à partir de la lumière solaire, une source inépuisable.

1.2 L'énergie solaire :

1.2.1 Gisement solaire :

Pour toutes les applications de l'énergie solaire, il est essentiel de bien comprendre le gisement solaire avant d'étudier les systèmes photovoltaïques. Le gisement solaire fait référence aux diverses caractéristiques du rayonnement solaire qui peuvent affecter les performances d'un système à un emplacement spécifique.[1]

1.2.2 Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire correspond à toutes les radiations électromagnétiques émises par le Soleil et qui parviennent jusqu'à la Terre. Il constitue une source d'énergie essentielle pour notre planète, jouant un rôle clé dans la photosynthèse des plantes et permettant la génération d'électricité via les systèmes photovoltaïques.

Il est constitué de photons d'énergie :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

Avec :

λ : Longueur d'onde,

h : Constante de Planck

c : Célérité de la lumière

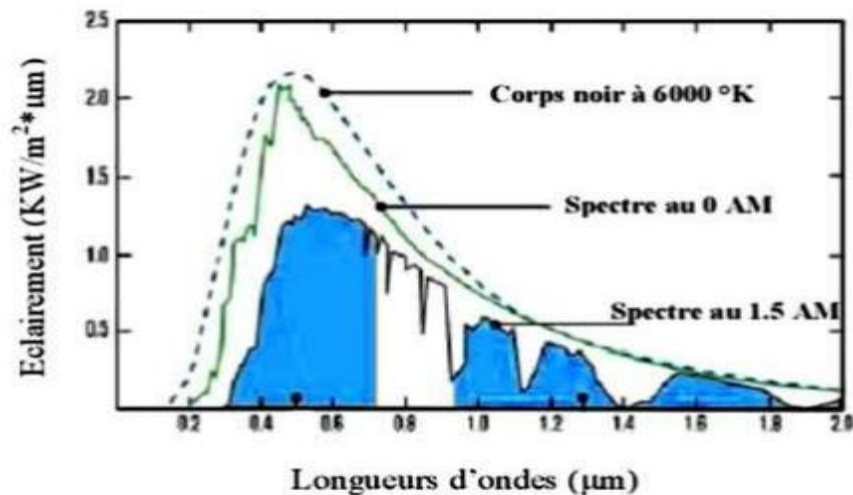


Figure 1.1 Spectre du rayonnement solaire

Il englobe une gamme variée de longueurs d'onde, comprenant la lumière visible, les infrarouges, les ultraviolets, les rayons X et les ondes radio. [1-2-3]

Au niveau du sol, on identifie plusieurs composantes de ces rayonnements :

1.2.2.1 Rayonnement direct

Le rayonnement direct du Soleil est reçu sans être diffusé par l'atmosphère, suivant un trajet en ligne droite. Les rayons sont parallèles entre eux, ce qui permet la formation d'ombres nettes et la possibilité de concentration par l'intermédiaire de miroirs.[5]

1.2.2.2 Rayonnement réfléchi ou un albédo :

Le rayonnement réfléchi, également connu sous le nom d'albédo, représente la fraction de lumière réfléchie par une surface. Son niveau varie en fonction de l'environnement spécifique du site. Par exemple, la neige reflète une grande quantité de lumière, tandis qu'un revêtement en asphalte en reflète très peu. Cette variation doit être prise en compte lors de l'évaluation du rayonnement sur des surfaces inclinées. [5]

1.2.2.3 Le rayonnement global :

Le rayonnement global au sol dépend de la composition et de l'épaisseur de l'atmosphère que les rayons lumineux traversent pendant la journée. Il se divise en rayonnement direct et rayonnement diffus, et ce sont ces deux formes de rayonnement que les générateurs solaires utilisent. [4]

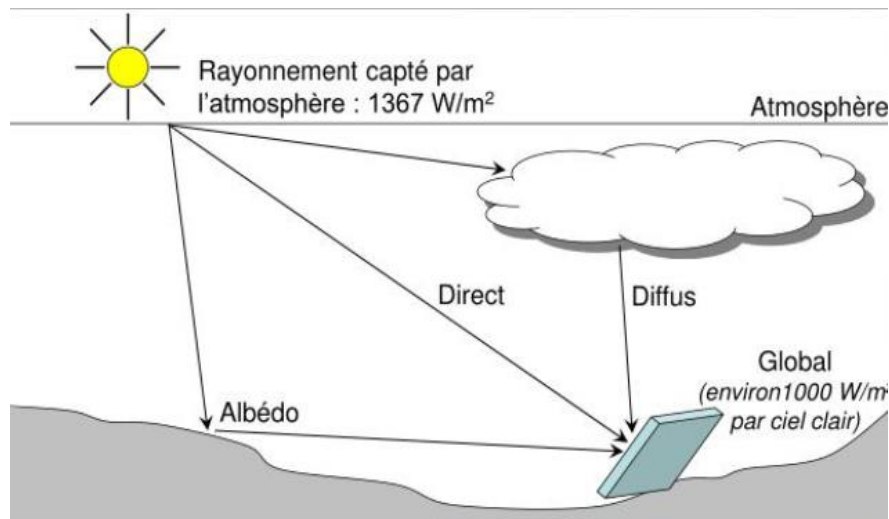


Figure 1.2 Composantes du rayonnement solaire au sol. [4]

1.3 Durée d'insolation

La durée d'insolation, également appelée durée d'ensoleillement, constitue un paramètre climatique crucial qui évalue la période pendant laquelle un lieu est exposé à la lumière directe du soleil sur une période donnée. Cette mesure reflète essentiellement le degré de couverture nuageuse et ne doit pas être confondue avec l'ensoleillement, qui quantifie la quantité d'énergie solaire reçue par unité de surface sur une période définie. Généralement exprimée en heures par an ou en moyenne d'heures par jour, la durée d'insolation offre une perspective sur le niveau d'exposition au soleil d'un endroit par rapport à d'autres régions du globe lorsqu'elle est exprimée en heures par an. En revanche, lorsqu'elle est indiquée en heures par jour, elle permet de comparer les variations saisonnières de l'ensoleillement à un même endroit. Un nombre d'heures d'insolation plus élevé suggère un climat plus clément, avec moins de présence de nuages et de brouillards.[4]

1.4 L'effet photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque exploite le principe physique connu sous le nom d'effet photovoltaïque, où une force électromotrice est induite lorsque la surface de la cellule est exposée à la lumière. La tension produite peut varier entre 0,3 V et 0,7 V selon le matériau utilisé, son agencement, ainsi que la température et l'usure de la cellule. Composée de deux couches de silicium, l'une dopée P (au bore) et l'autre dopée N (au phosphore), une cellule PV forme ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transfèrent leur énergie aux atomes de la jonction PN, libérant ainsi

des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci engendre une différence de potentiel entre les deux couches, mesurable entre les bornes positive et négative de la cellule. Par le biais d'un courant continu, les porteurs peuvent également être collectés.[8]

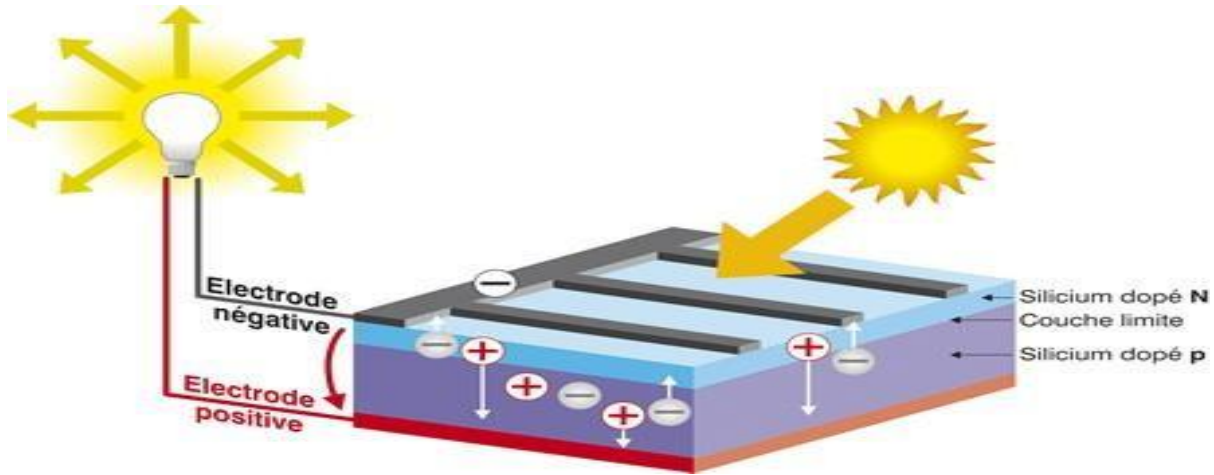


Figure 2.3 Représentation schématique de l'effet photovoltaïque. [8]

1.5 La cellule photovoltaïque (photopile) :

Une photopile, ou cellule photovoltaïque, est conçue à partir d'un semi-conducteur capable d'absorber l'énergie lumineuse et de la convertir directement en courant électrique. Ces cellules se composent de plusieurs éléments :

- Une fine couche semi-conductrice, tel que le silicium, qui possède une bande interdite déterminant la barrière énergétique que les électrons doivent surmonter pour être excités. Les propriétés électroniques de cette couche peuvent être ajustées.
- Une couche antireflet favorisant la pénétration maximale des rayons solaires.
- Une grille conductrice située sur le dessus, agissant comme la cathode, et un métal conducteur en dessous, servant d'anode.

Les modèles les plus récents intègrent même une combinaison innovante de plusieurs couches réfléchissantes juste en dessous du semi-conducteur. Cette configuration permet à la lumière de rebondir plus longtemps dans la cellule, améliorant ainsi son rendement.[9]

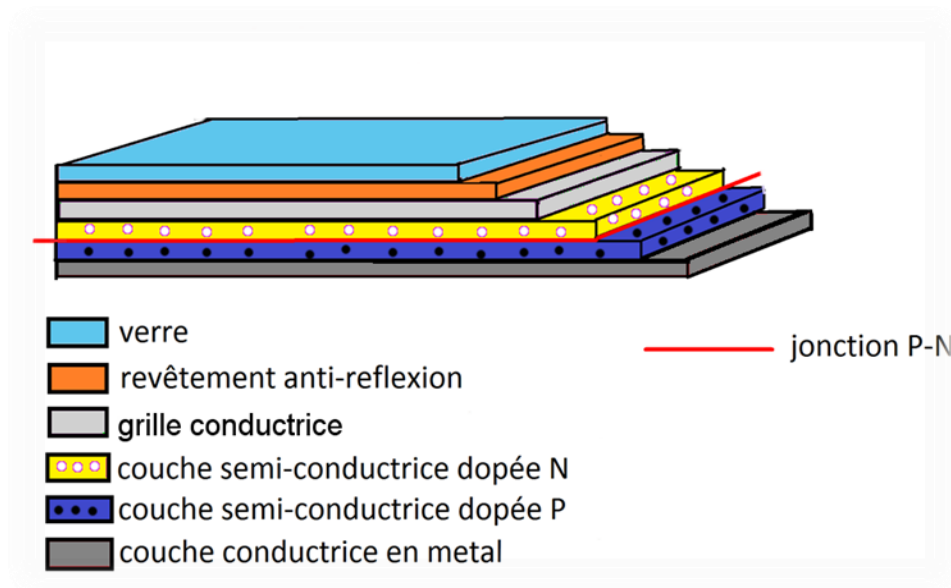


Figure 1.4 Structure basique d'une cellule solaire. .[9]

1.5.1 Principe De Fonctionnement

Une cellule photovoltaïque, souvent composée de silicium, est un dispositif semi-conducteur formé de deux couches, l'une dopée P et l'autre dopée N, créant une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transfèrent leur énergie aux atomes de la jonction PN, libérant ainsi des électrons (charges N) et des trous (charges P). Cela engendre une différence de potentiel entre les deux couches, mesurable à travers les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. [9]

1.5.2 Les différentes technologies des cellules photovoltaïques

Il existe diverses catégories de cellules solaires, également connues sous le nom de cellules photovoltaïques, chacune avec ses caractéristiques spécifiques en termes de rendement et de coût. Toutefois, toutes présentent des rendements relativement modestes, variant généralement entre 8 et 23 % de conversion de l'énergie solaire reçue. Actuellement, trois types principaux de cellules solaires prédominent. [11]

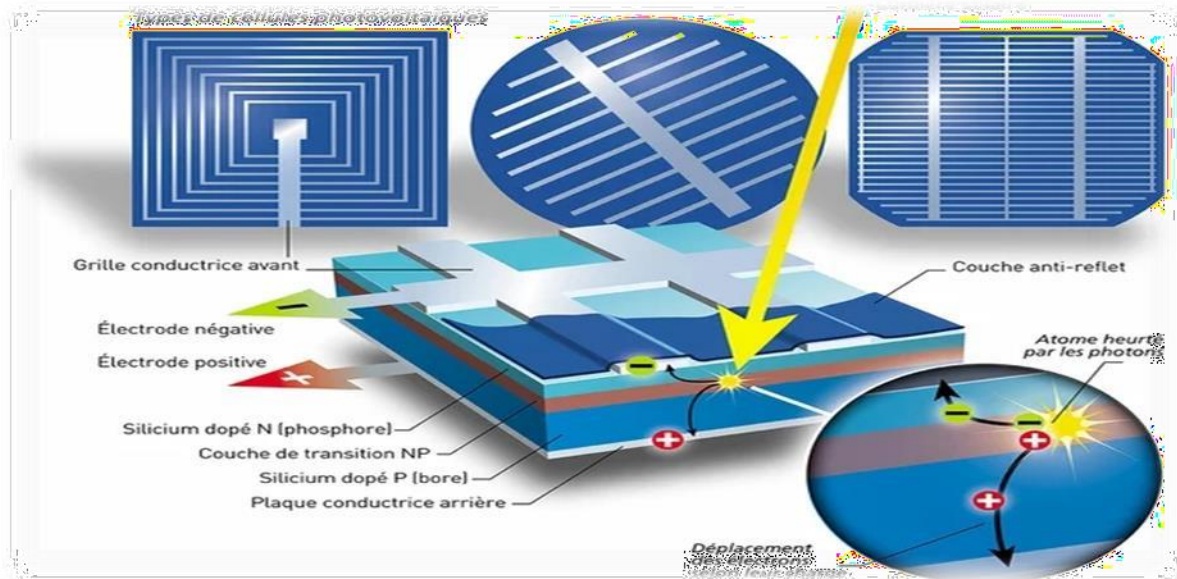


Figure 1.5 Représentation schématique d'une cellule photovoltaïque. [11]

1.5.3 Différentes technologies des cellules photovoltaïques.

Il existe diverses catégories de cellules solaires, également connues sous le nom de cellules photovoltaïques, chacune avec ses caractéristiques spécifiques en termes de rendement et de coût. Toutefois, toutes présentent des rendements relativement modestes, variant généralement entre 8 et 23 % de conversion de l'énergie solaire reçue. Actuellement, trois types principaux de cellules solaires prédominent [11].

Cellules monocristallines : Fabriquées à partir de silicium monocristallin pur, ces cellules offrent une efficacité élevée pouvant atteindre 22 %.[3]

Cellules polycristallines : Constituées de silicium polycristallin, ces cellules affichent une efficacité inférieure à celle des cellules monocristallines, atteignant jusqu'à 17%. Néanmoins, elles sont plus économiques que leurs homologues monocristallines.

Cellules à base de silicium amorphe : Fabriquées à partir de couches minces de silicium amorphe, ces cellules présentent une efficacité inférieure à celle des cellules polycristallines, atteignant jusqu'à 12%. Toutefois, leur grande flexibilité permet de les intégrer aisément à des surfaces courbes ou en forme de coque.

Cellules à base de cuivre, indium, gallium et sélénium (CIGS) : Ces cellules photovoltaïques, à haut rendement, possèdent une efficacité pouvant atteindre 21%. Elles sont produites à partir de couches minces de matériaux de transition comme le cuivre, l'indium, le gallium et le sélénium.

Cellules à base de pérovskite : Il s'agit de cellules photovoltaïques innovantes qui ont connu une croissance fulgurante en matière d'efficacité et de rentabilité. Elles sont élaborées à partir de cristaux de pérovskite et peuvent présenter une efficacité allant jusqu'à 24%. [3]

Les cellules à jonctions multiples : Ces cellules intègrent une stratification de divers matériaux photovoltaïques afin de maximiser la capture du spectre solaire et d'optimiser l'efficacité. [3]

Les cellules sensibilisées à la couleur : Ces cellules exploitent l'utilisation de colorants pour absorber la lumière et générer de l'électricité. Elles sont fréquemment associées à d'autres matériaux photovoltaïques afin d'améliorer l'efficacité globale. [3]

Les cellules hybrides en film mince : Ces cellules fusionnent des technologies photovoltaïques en film mince avec d'autres matériaux, notamment le silicium, dans le but d'accroître leurs performances. [3]

Chaque technologie de cellule photovoltaïque présente ses propres avantages et inconvénients en matière de coût, d'efficacité, de durabilité et de flexibilité. Le choix de la technologie appropriée dépendra des besoins spécifiques de chaque application.

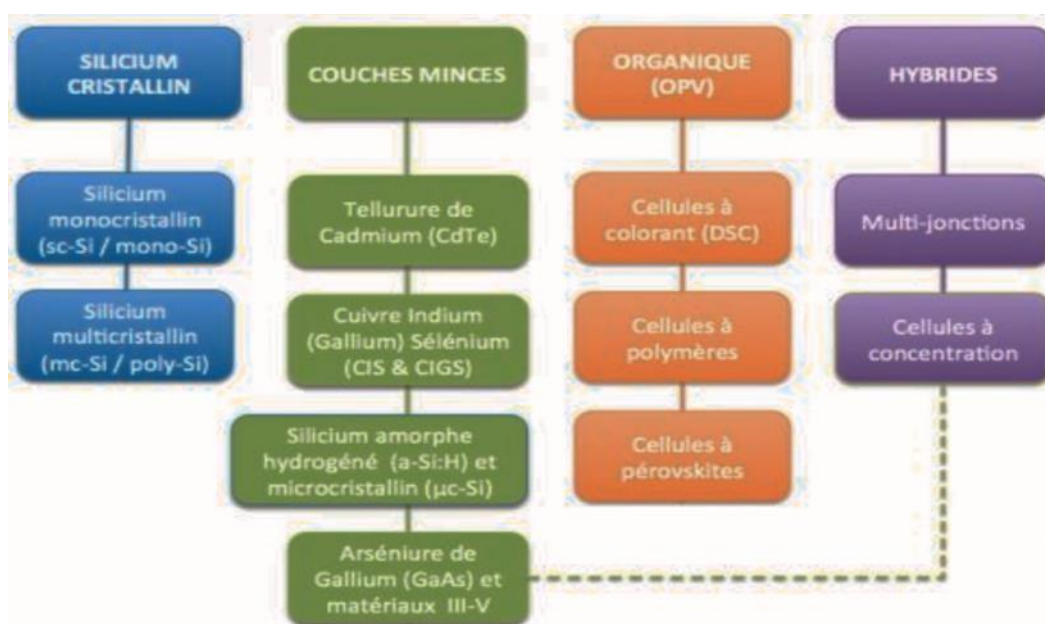


Figure 1.6 différentes technologies des cellules photovoltaïques. [3]

1.5.4 Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire :

L'équivalent électrique et le modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque sont des outils essentiels pour comprendre et analyser son comportement. Le circuit équivalent simule le fonctionnement électrique de la cellule à l'aide de divers composants électroniques, comme les résistances en série ou en parallèle et les diodes. Le modèle mathématique, quant à lui, utilise des équations pour représenter le processus de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par la cellule.

1.5.4.1 Générateur photovoltaïque idéal

Ensuite, nous allons passer à la modélisation d'une cellule photovoltaïque. Alors pour ce faire, nous allons prendre en considération le schéma électronique équivalent ci-dessous (figure). Dans un premier temps nous allons travailler sur une cellule idéale illustré par une diode en parallèle avec une source du courant. I_{ph} est désigné par une source du courant c'est le photo- courant (généré) et la branche de diode un courant I_d . [13]

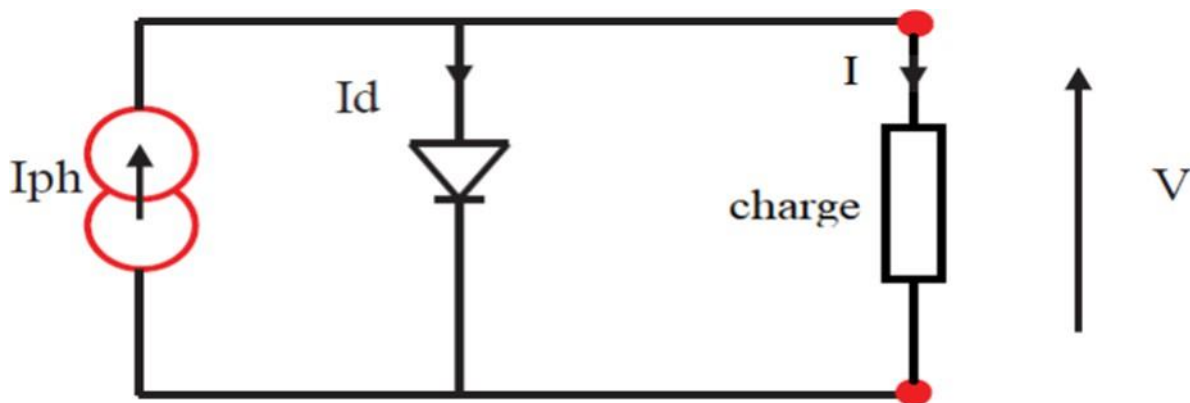


Figure 1.7 Schéma du circuit équivalent simplifié d'une cellule photovoltaïque. [13]

Courant délivré par la cellule photovoltaïque délivre un courant à l'aide de l'éclairement pour la charge R s'écrit :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (1.2)$$

I : courant fourni par la cellule

I_{ph} : Courant généré par la lumière incidente

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{v}{\alpha v_t}\right) - 1 \right] \quad \text{avec } v_t = \frac{k \cdot T}{q}$$

Donc l'équation du courant délivré par une cellule photovoltaïque est décrite comme suit :

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{v}{\alpha v_t}\right) - 1 \right] \quad (I. 3)$$

α : Le facteur d'idéalité de la jonction

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode.

q : Charge de l'électron = $1,60217646 \times 10^{-19} \text{C}$.

k : Constante de Boltzmann = $1,3806503 \times 10^{-23} \text{J/K}$.

V_t : potentielle thermodynamique

T : Température en kelvin

V : tension aux bornes de cellule

Si l'on considère des cellules photovoltaïques réelles, il est important de prendre en compte des paramètres supplémentaires tels que l'effet de résistance, la recombinaison et la fuite de bord. Pour modéliser un générateur photovoltaïque, on utilise un circuit équivalent comprenant une source de courant I_{ph} , deux résistances R_s et R_{sh} ainsi qu'une diode en parallèle

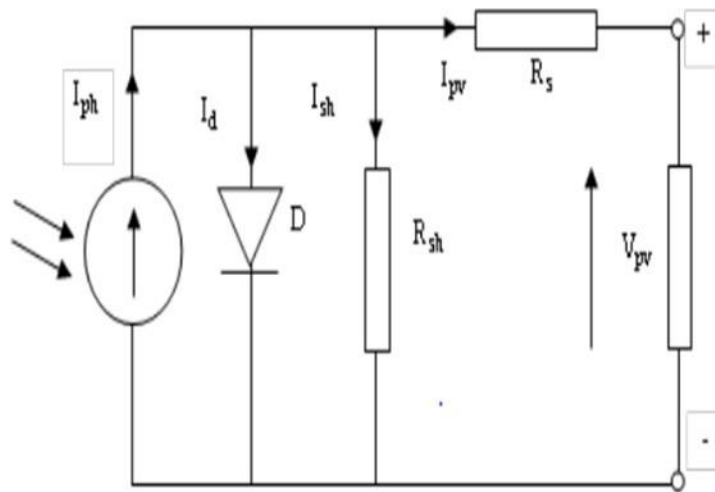


Figure 1.8 Schéma électrique équivalent d'une cellule PV. [13]

Le courant délivré par la cellule est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I. 4)$$

Le courant de la branche parallèle s'écrit :

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (I. 5)$$

La tension aux bornes de la diode étant égale à :

$$V_d = V_{pv} + R_s \cdot I_{pv} \quad (1.6)$$

Le courant de la diode représente le courant de fuite interne à une cellule causée par la jonction P-N de la cellule et s'écrit :

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{v_d}{v_t}\right) - 1 \right) \quad (1.7)$$

Avec :
$$V_t = \frac{a \cdot k \cdot T_c}{q}$$

Le courant de saturation inverse de la jonction I_s :

$$I_s = I_{sn} \left(\frac{T_c}{T_n} \right)^3 \cdot \exp\left(\frac{q \cdot E_g}{a \cdot k} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_c} \right) \right) \quad (1.8)$$

$$I_s = \frac{I_{ccn}}{e^{\frac{qV_{0c}}{a \cdot k T_1} - 1}} \quad (1.9)$$

Le photo-courant I_{ph} est directement dépendant du rayonnement solaire incident G et de la température de la cellule T_c , il est donné par la relation suivante :

$$I_{ph} = I_{cc} = \frac{G}{G_0} \left(I_{phn} + k_i (T_c - T_n) \right) \quad (1.10)$$

$$k_i = \frac{I_{cc}(T_2) - I_{cc}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (1.11)$$

Avec : $k_i = 4.10^{-4} jK^{-1}$

La température de la cellule T_c varie en fonction de l'éclairement et de la température ambiante, selon la relation linéaire :

$$T_c = T_a + \frac{T_n - 20}{800} G \quad (1.12)$$

Ainsi le courant fourni par le GPV peut s'écrire :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp^{\frac{q}{a \cdot k T_c} (v_{pv} + R_s I_{pv})} - 1 \right) - \frac{v_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (1.13)$$

Puissance fournie :

$$P = V_{pv} \cdot I_{pv} = V_{pv} \left(I_{ph} - I_s \left(\exp^{\frac{q}{a \cdot k T_c} (v_{pv} + R_s I_{pv})} - 1 \right) - \frac{v_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \right) \quad (1.14)$$

1.5.4.2 Paramètre des cellules photovoltaïques :

Les caractéristiques des cellules photovoltaïques (V_{oc} , I_{pv} , FF, η), obtenues à partir des courbes courant-tension, fournissent une base de comparaison entre différentes cellules exposées à des conditions similaires. Ces paramètres peuvent être obtenus soit à partir des courbes courant-tension, soit à partir de l'équation caractéristique. Les plus couramment utilisés sont les suivants.[12]

1.5.4.2.1 Courant de court-circuit :

Le courant qui annule la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est appelé courant de court-circuit. En conditions idéales ($R_s = 0$ et $R_{sh} = \infty$), ce courant est équivalent au courant photo I_{ph} . Dans le cas contraire, il annule la tension V . Pour la plupart des cellules solaires avec une résistance série très faible, le terme peut être négligé.

$$I_s \left(\exp^{\frac{q}{a \cdot k T_c} (v_{pv} + R_s I_{pv})} - 1 \right) - \frac{v_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} = 0$$

Devant I_{ph} l'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (1.15)$$

Tension de circuit-ouvert (V_{oc}) :

C'est la tension V_{oc} pour laquelle le courant débité par la cellule est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'une cellule).[12]

$$0 = I_{ph} - I_s \left(\exp^{\frac{q}{a \cdot k T_c} (V_{co})} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (1.16)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$v_{oc} = \frac{q}{a \cdot k \cdot T_c} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (1.17)$$

Rendement énergétique :

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule $P_{max}(I_{opt}, V_{opt})$ et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

$$\eta = \frac{p_{max}}{p_{inc}} = \frac{I_{opt} * V_{opt}}{p_{inc}} \quad (1.18)$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

1.5.4.2.2 Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule $P_{max}(I_{opt}, V_{opt})$ et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit-ouvert V_{oc} . [9]

$$FF = \frac{p_{max}}{I_{cc} * V_{cc}} \quad (1.19)$$

1.6 Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque regroupe divers équipements conçus pour exploiter l'énergie solaire afin de répondre aux besoins en charge. En fonction de la puissance souhaitée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour former un "champ photovoltaïque". Lorsqu'il est directement connecté au récepteur sans autre composant, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique délivrée dépend de l'ensoleillement. Ainsi, elle est maximale lorsque le soleil est au zénith et nulle pendant la nuit. [7]

1.7 Association des cellules

Les générateurs photovoltaïques sont constitués par l'association de nombreuses cellules élémentaires, connectées en série et/ou en parallèle.

1.7.1 Association en série

Associer des cellules en série (N_s) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Dans cette configuration, les cellules sont parcourues par le même courant et la caractéristique résultante de l'association en série est obtenue en additionnant les tensions de chaque cellule individuelle. L'équation ci-dessous résume les caractéristiques électriques d'une telle association en série de (N_s) cellules. [4]

$$V_{oc_{ns}} = N_s * V_{oc} \text{ avec } I_{cc} = I_{cc_{ns}} \quad (I. 20)$$

V_{ocns} : La somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

I_{ccns} : Courant de court-circuit de N_s cellules en série.

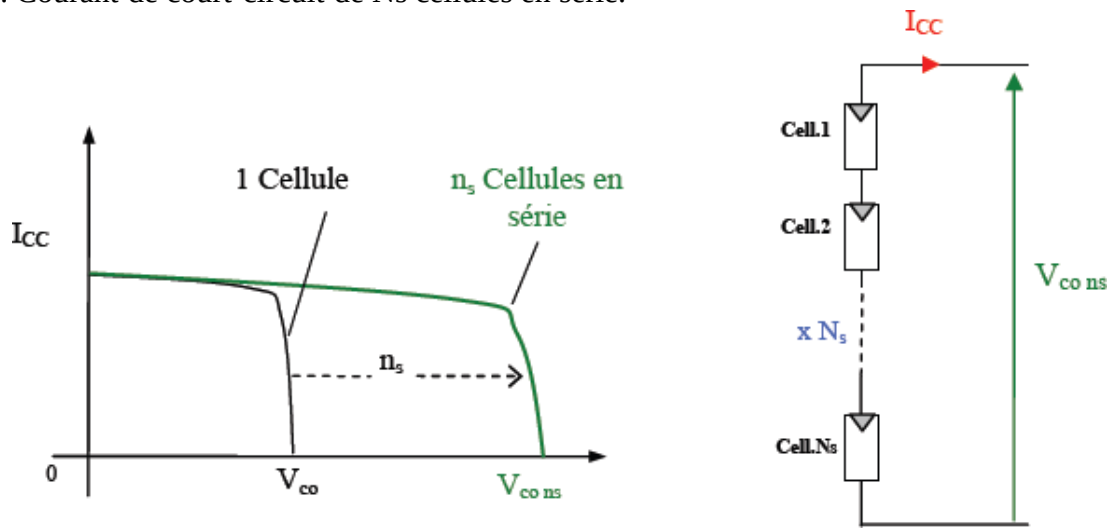


Figure 1.9 Caractéristiques résultantes d'un groupement de n_s cellules en série.[4]

1.7.2 Association en parallèle :

Associer des cellules en parallèle (N_p) est une option qui permet d'augmenter le courant de sortie du générateur ainsi constitué. Lorsque des cellules identiques sont connectées en parallèle, elles sont toutes soumises à la même tension, et la caractéristique résultante de ce groupement est obtenue en additionnant les courants de chaque cellule.[4]

$$I_{sc_{np}} = n_p * I_{sc} \text{ avec } V_{oc_{np}} = V_{oc} \quad (I. 21)$$

$I_{sc_{np}}$: La somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle.

$V_{oc_{np}}$: Tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.

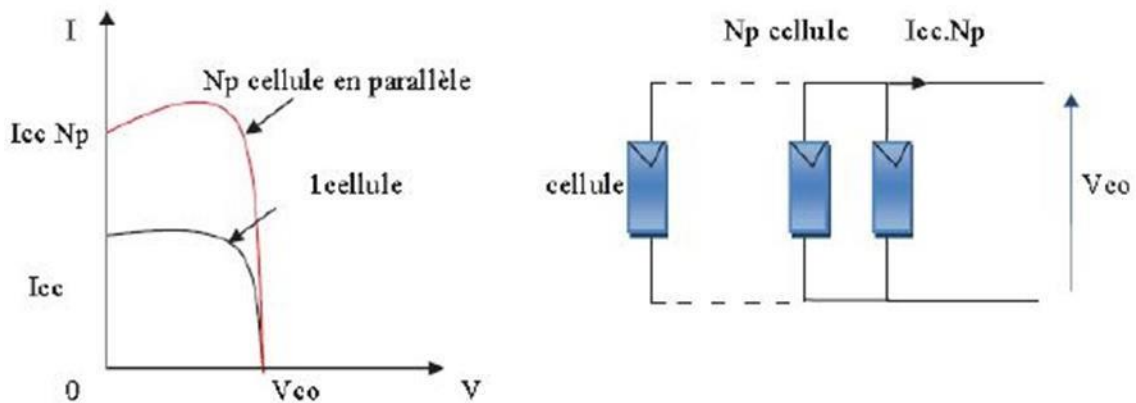


Figure 1.10 Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.[4]

1.7.3 Association mixte (série parallèle)

Pour atteindre des puissances de quelques kilowatts, avec une tension appropriée, il est impératif de regrouper les modules en panneaux et de les disposer en rangées, connectées en série et en parallèle. Cela constitue ce que l'on nomme un générateur photovoltaïque.[12]

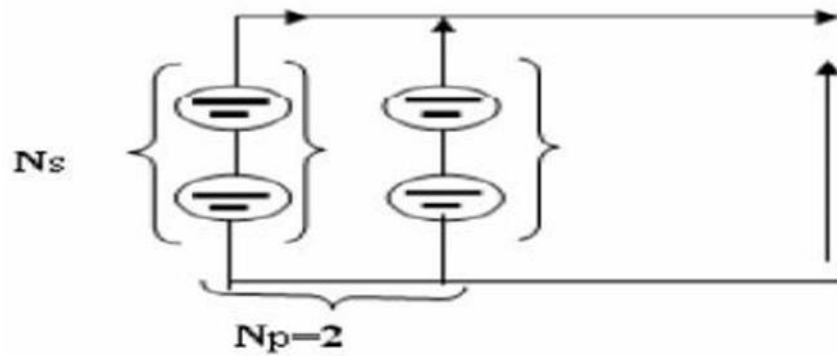


Figure 1.11 Association mixte des modules.[12]

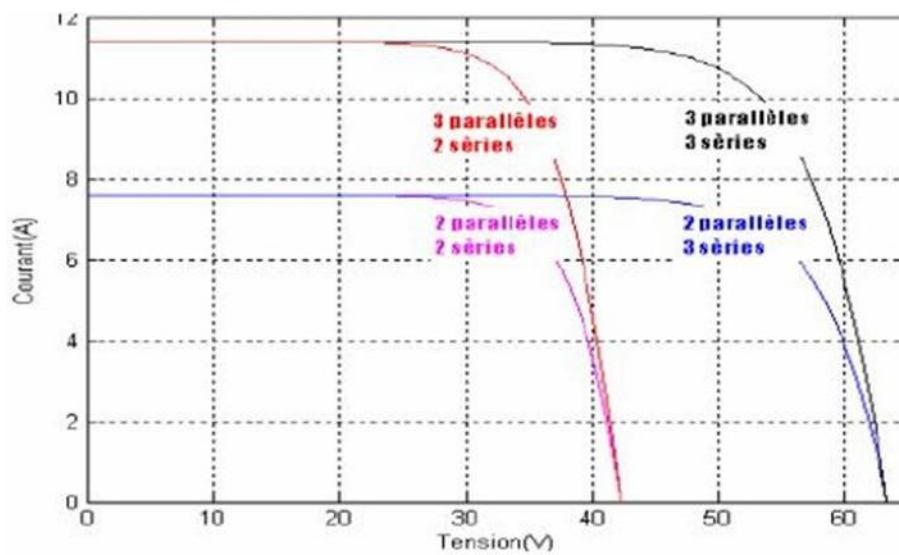


Figure 1.12 Caractéristiques I-V pour l'association mixte. .[12]

1.7.4 Les caractéristiques et les problèmes potentiels des générateurs solaires.

Un générateur solaire est constitué d'un réseau de cellules solaires interconnectées en série ou en parallèle. Sa performance globale peut varier en fonction de facteurs tels que l'intensité lumineuse, la température, le vieillissement des cellules et les effets d'ombrage ou d'irrégularités de l'éclairement. L'occultation ou la dégradation d'une seule cellule peut entraîner une baisse significative du courant solaire généré par le générateur. Si le courant traversant cette cellule est supérieur à celui produit par une cellule faiblement éclairée, cette dernière peut devenir un point de récepteur, risquant ainsi une dissipation excessive de puissance électrique. Ce phénomène, appelé "point chaud" ou "hot spot", peut conduire à la destruction de la cellule si la situation persiste. Pour prévenir ce problème, les panneaux solaires sont munis de diodes de dérivation qui court-circuitent les cellules défectueuses. Cependant, cette solution réduit la puissance produite par le générateur et la tension aux bornes du panneau. Ainsi, en cas de défaillance d'une cellule, le groupe de cellules associé à cette cellule défectueuse, protégé par la diode de dérivation, peut cesser de produire de l'énergie. Il est important de noter que cette perte partielle de puissance due à une cellule défectueuse est préférable à une perte totale du générateur en cas de dysfonctionnement d'une cellule, si le générateur fonctionne sans protections.

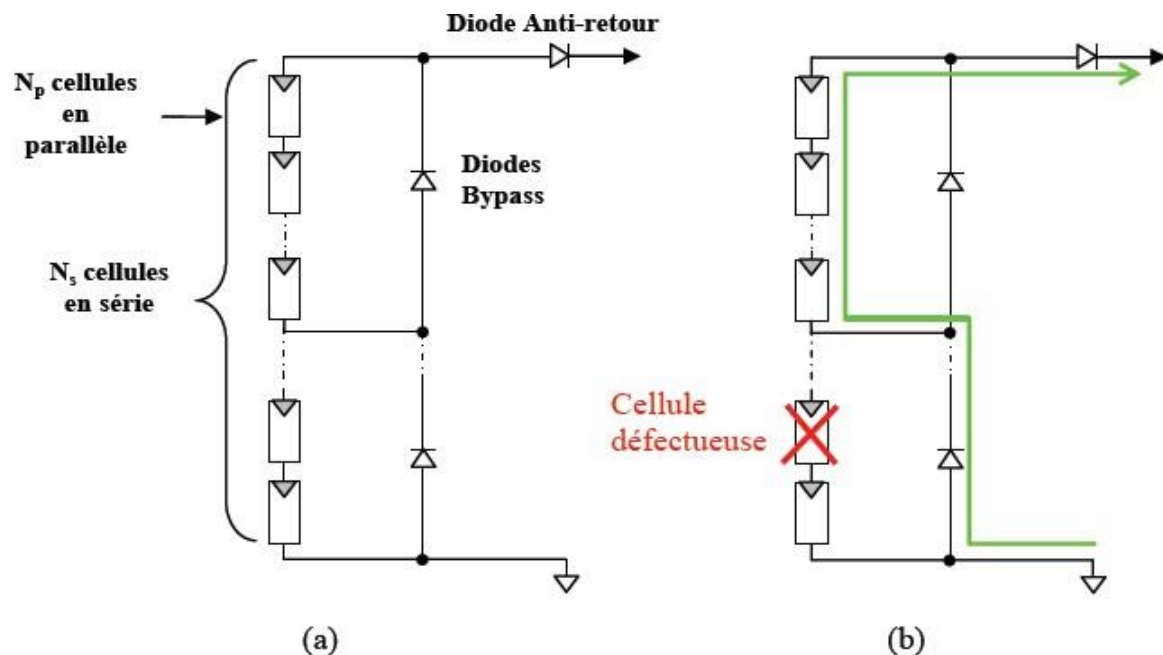


Figure 1.13 (a) Architecture Classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protections (b) Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode by-pass. [6]

1.8 Comportement d'un générateur photovoltaïque

En raison de sa constitution, un générateur PV aura un comportement plus ou moins optimisé et pourra ainsi produire plus ou moins de puissance.

1.8.1 Influence de l'éclairement

Bien sûr, la production d'énergie photovoltaïque d'un panneau dépend directement du flux lumineux reçu, car c'est sa principale source d'énergie. Cependant, tous les paramètres de la caractéristique ne réagissent pas de la même manière. Sur la partie gauche des courbes (Figure I-14), on observe que le courant est proportionnel au rayonnement lumineux à ces niveaux d'éclairement ($> 200 \text{ W/m}^2$). En revanche, la tension subit une dégradation moindre lorsque l'intensité lumineuse diminue. [15]

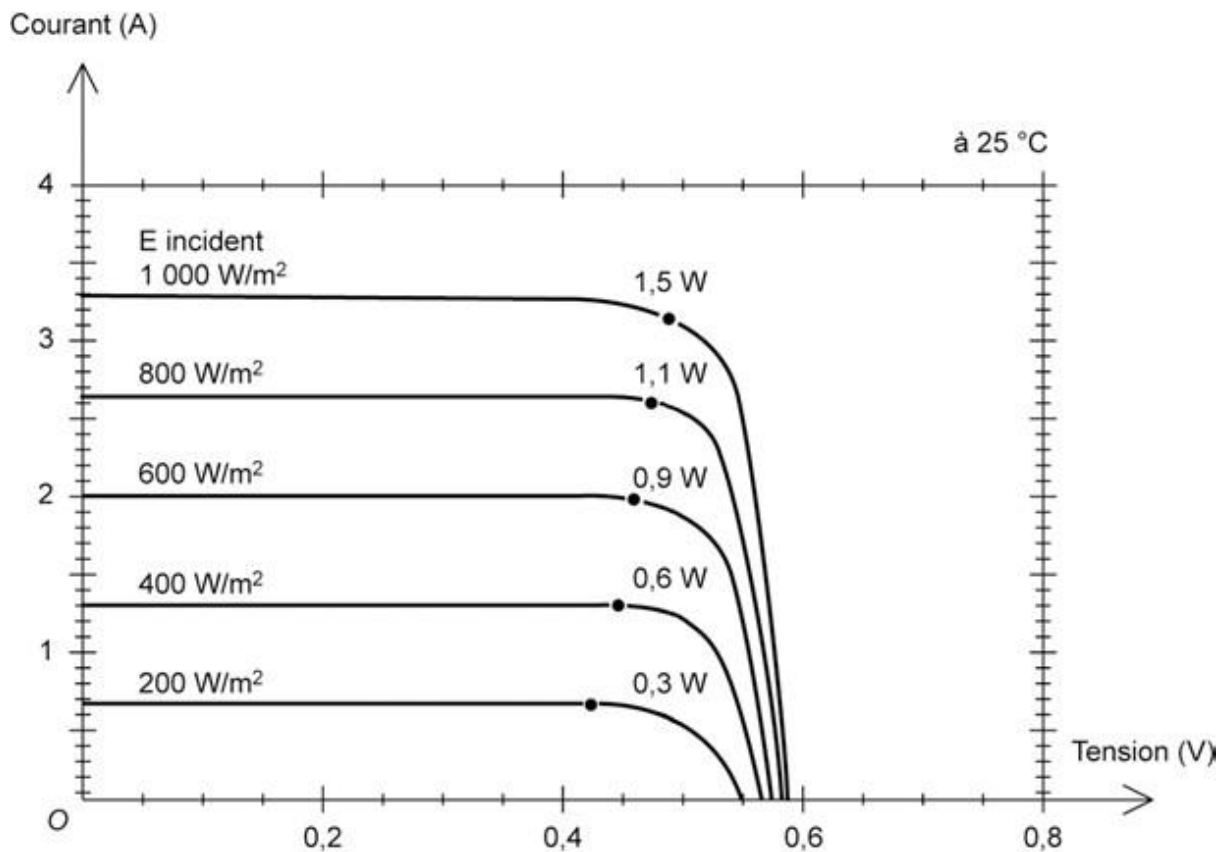


Figure 1.14 Courbes I(V) sous diverses intensités de rayonnement d'une cellule [5].

1.8.2 Influence de la température

La température a un impact important sur les performances des cellules cristallines, et donc sur la conception et la production des panneaux et des systèmes.

En effet, la tension d'une cellule cristalline baisse assez fortement avec la température. Cet effet est représenté à la (Figure I-15) où l'on voit différentes courbes d'une cellule cristalline entre 10 et 75 °C sous un ensoleillement de 1 000 W/m². [5]

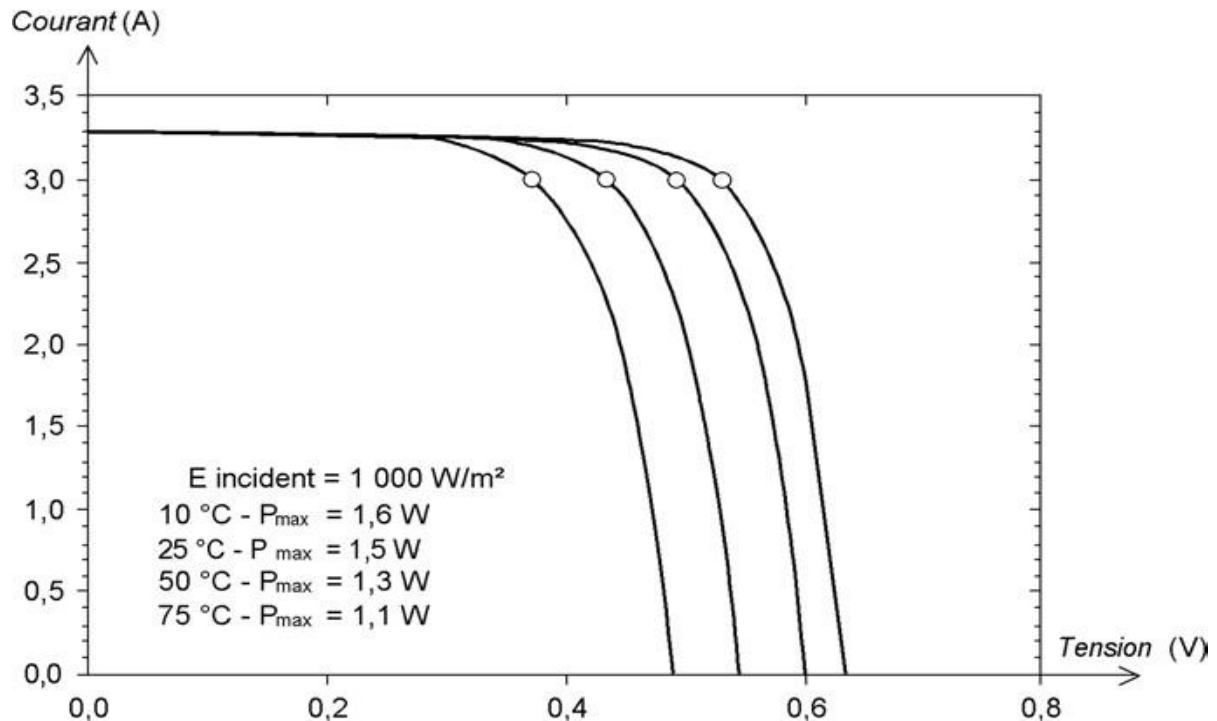


Figure 1.15 Effet de la température sur la caractéristique I-V. [5]

1.9 L'effet de l'ombrage :

L'ombrage résulte des obstacles situés entre les rayons du soleil et les panneaux solaires photovoltaïques, générant ainsi des zones d'ombre. Les propriétaires de ces panneaux doivent composer avec les ombres projetées par des structures, des arbres ou d'autres végétations. Ces ombres diminuent la production d'énergie des panneaux solaires, et l'ampleur de cette réduction est influencée par la taille et la densité des obstacles. Il est conseillé d'estimer les pertes potentielles avant de procéder à l'installation des panneaux solaires. [Edf]

Il est possible de catégoriser les ombrages en deux types distincts :

- L'ombrage partiel : C'est un type d'ombrage qui laisse partiellement passer les rayons du soleil.
- L'ombrage total : On qualifie d'ombrage total ou complet une situation où le panneau est entièrement couvert (par une couverture, une branche

cassée, de la saleté, etc.).

Il est essentiel de comprendre que les cellules photovoltaïques sont connectées en série. Par conséquent, une cellule affaiblie peut affecter les performances des autres cellules de la chaîne. Si une ligne de cellules est totalement ombragée, cela peut rendre l'ensemble du module photovoltaïque inefficace. Cependant, les panneaux solaires modernes sont équipés de diodes de dérivation (by-pass), ce qui permet de réduire l'impact d'une ombre sur une partie du panneau. [12-EDF]

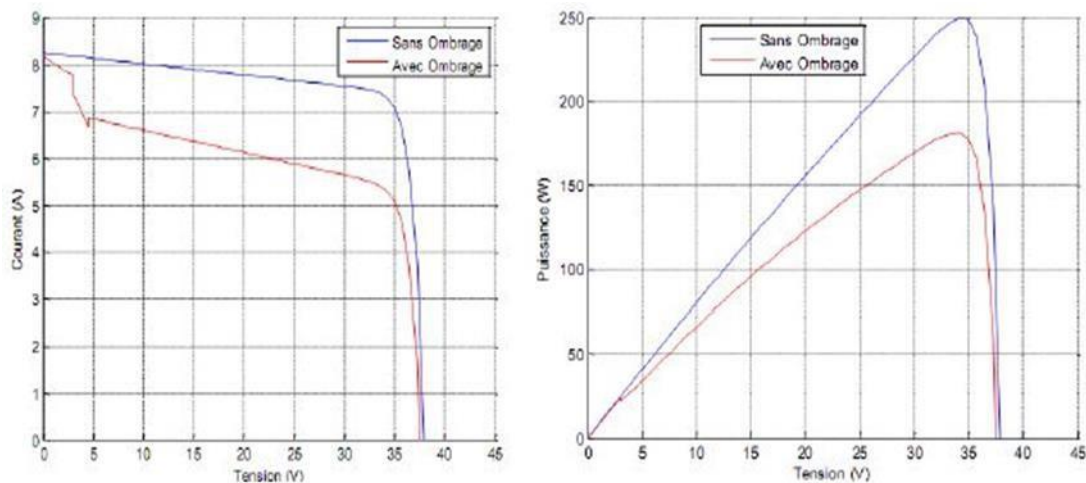


Figure 1.16 Caractéristique I-V est P-V des Cellules PV avec et son ombrage.

1.10 Les différentes connexions des systèmes photovoltaïques

Selon la manière dont l'énergie est utilisée, il existe trois différents types de Systèmes PV :

- Systèmes autonomes.
- Systèmes hybrides.
- Systèmes raccordés au réseau.[16]

1.10.1 Les systèmes autonomes

Selon le besoin, les systèmes autonomes alimentent un ou plusieurs consommateurs localisés dans des zones isolées du réseau électrique.[16]

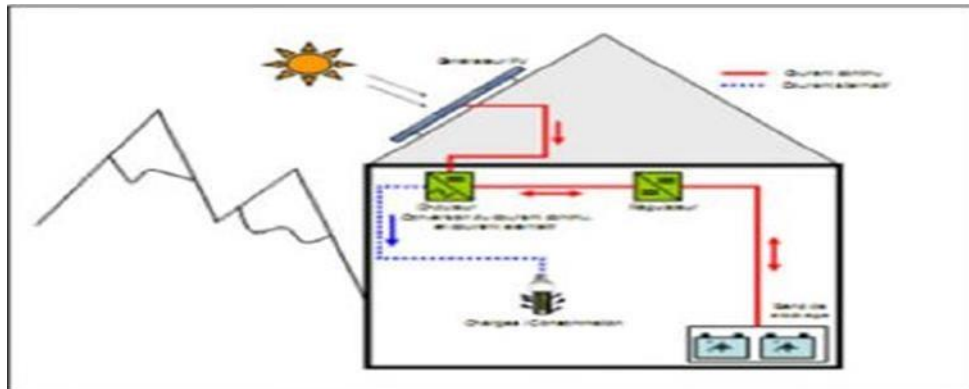


Figure 1.17 Structure d'un système PV autonome. [16]

1.10.2 Les systèmes Hybrides

Les systèmes photovoltaïques hybrides combinent un générateur photovoltaïque avec d'autres sources telles que l'éolien, les groupes électrogènes, les systèmes hydroélectriques, voire parfois le réseau électrique public.[16]

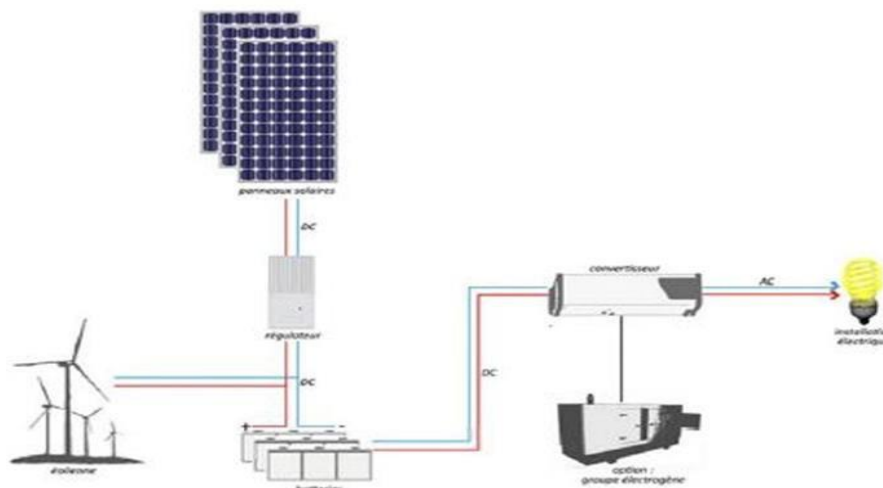


Figure 1.18 Structure d'un système hybride. [16]

1.10.3 Les systèmes raccordés au réseau

Un système photovoltaïque relié au réseau est directement connecté au réseau électrique via des convertisseurs. Ce type de système présente de nombreux avantages pour le producteur ou le consommateur, car c'est le réseau qui assure l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité.[16]

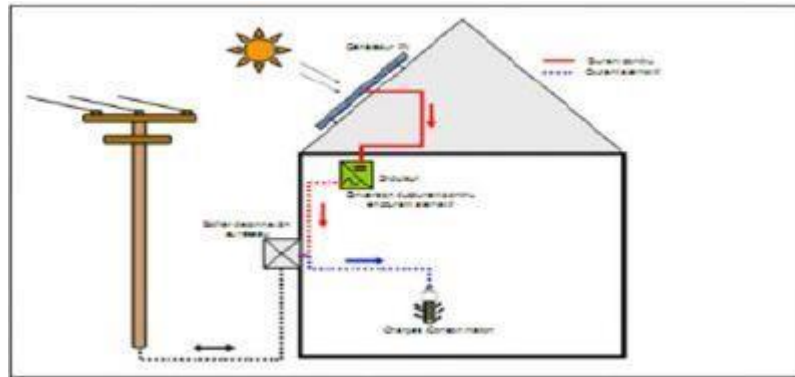


Figure 1.19 Structure d'un système photovoltaïque connecté au réseau.[16]

1.10.3.1 Vision sur les réseaux électrique

1.10.3.1.1 Niveaux de tensions des réseaux

Les réseaux électriques sont hiérarchisés : D'une façon générale, la plupart des pays mettent en œuvre :

- Un réseau de transport THT 220 800 KV.
- Un réseau de répartition HTB 60170 KV.
- Un réseau de distribution HTA 1 50 KV.
- Un réseau de livraison de l'abonné BTA 400/230 V.

Cette hiérarchie c'est-à-dire, les niveaux de tensions utilisés varient considérablement d'un pays à l'autre en fonction des paramètres liés à l'histoire électrotechnique du pays, ses ressources énergétiques, sa surface et finalement des critères technico-économiques [27]

1.10.3.1.2 Les postes électriques

Il existe plusieurs types de postes électriques :

- Postes de sortie de centrale.
- Postes d'interconnexion.
- Postes élévateurs.
- Postes de distribution [27].

1.10.3.1.3 Les lignes électriques

Nous distinguons quatre types de lignes :

- Ligne de distribution à basse tension.
- Ligne de distribution à moyenne tension.
- Ligne de transport à haute tension.
- Ligne de transport à très haute tension [27]

1.10.3.2 Les centrales solaire ou photovoltaïque

Une centrale solaire photovoltaïque est un dispositif technique de production d'électricité par des modules solaires photovoltaïques (PV) reliés entre eux (série et parallèle) et utilise des onduleurs pour être raccordée au réseau. Les centrales solaires sont de plus en plus puissantes (plus de 100 MWc en 2012), contrairement aux systèmes solaires photovoltaïques autonomes destinés à l'alimentation en électricité de bâtiments ou d'installations isolées (autoconsommation) dont la puissance dépasse rarement 100 KWc [28].

1.10.3.2.1 Classements des centrales photovoltaïques connectées au réseau

Selon leurs tailles les CPCr peuvent être classifiés de la façon suivante :

- Centrales de petite taille ($P_w = 1$ à 10KW).
- Centrales de taille moyenne ($P_w = 10$ à 100 KW).
- Centrales de grandes tailles ($P_w \geq 500$ KW) [29].

1.10.3.3 Vision sur les systèmes photovoltaïque raccordé au réseau

Dans ce système, l'ensemble de l'installation est connecté au réseau de distribution après une adaptation des paramètres. L'énergie produite est soit consommée sur place par l'utilisateur et le surplus est injecté sur le réseau, ou bien injectée en totalité dans le réseau électrique sans limite. Ces dernières centrales peuvent être conçues avec ou sans stockage [31].

1.10.3.3.1 Éléments constitutifs d'une installation PV connecté au réseau

Elle est constituée de trois éléments essentiels [19] :

- Les panneaux photovoltaïques

- Un compteur d'énergie (en fait, en général, deux compteurs dans le cas des installations décentralisées).
- Un onduleur synchrone qui transforme le courant pour qu'il soit compatible avec les caractéristiques du réseau. C'est "l'interface" entre l'installation et la compagnie d'électricité.
- Accessoires.

1.10.3.3.2 Les systèmes PV connectés au réseau sans stockage

Ces systèmes sont ainsi conçus pour fonctionner en parallèle et en interconnexion avec le réseau public d'électricité pour couvrir les besoins en énergie. Les principaux composants de la connexion au réseau de ce type de système sont l'onduleur et le transformateur. Il convertit la puissance continue obtenue à partir des modules PV en puissance alternative en respectant les conditions de qualité de la tension et de la puissance exigées par le réseau, avec une possibilité d'arrêt automatique quand le réseau n'est pas en fonctionnement. Une interface bidirectionnelle est placée entre la sortie alternative du système PV et le réseau constitué par un dispatching. La maintenance de ce système fonctionnant sans batterie, est particulièrement facile. Elle se limite à la vérification de l'état de propreté des modules (PV), comme est indiqué sur la figure 2.20. [31]

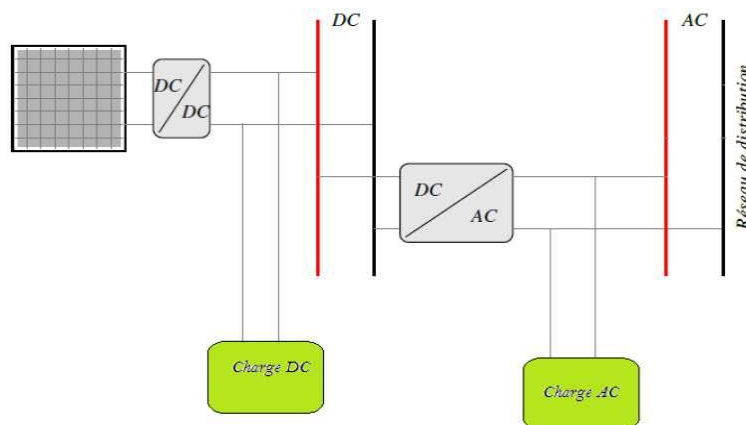


Figure 2.20 Installation photovoltaïque relié au réseau sans batterie. [31]

1.10.3.3.3 Les systèmes PV connectés au réseau avec batterie de stockage

Ce système a pour objectif de permettre, en absence d'énergie fournie par le réseau, l'utilisation d'énergie stockée par les batteries et celle fournie par le champ photovoltaïque afin d'alimenter des usages prioritaires de l'installation. Les batteries d'accumulateurs et

l'onduleur forment une alimentation sans interruption (ASI) pour le système comme le montre la figure 2.21 Cette configuration permet d'utiliser au maximum l'énergie produite par les modules PV par l'intermédiaire des caractéristiques spécifiques de l'onduleur permettant un fonctionnement en mode synchrone sur la sortie du réseau. [31]

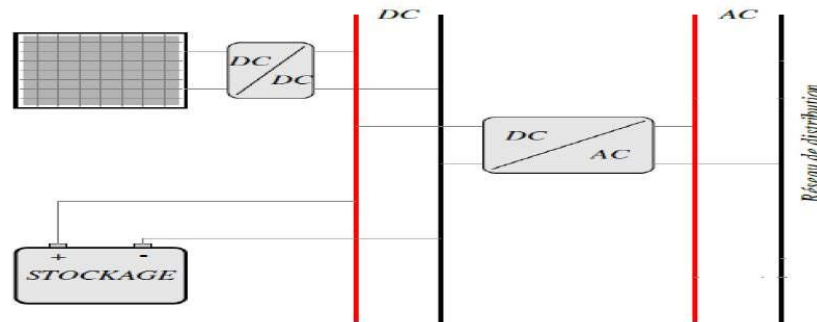


Figure 2.21 Installation photovoltaïque relié au réseau avec batterie. [31]

1.10.3.4 Types de structure d'un système PV

Il existe deux types de structures photovoltaïques connectées au réseau électrique.

➤ **Les structures à connexion directe au réseau** : cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque qui est connecté à l'aide d'un onduleur au réseau électrique. Il existe dans la littérature de nombreux d'exemples.

➤ **Les structures à bus continu en intermédiaire** : Le générateur est connecté a un bus continu en intermédiaire d'un convertisseur continu-continu. Un onduleur délivre une tension modulée. Celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique, on obtient alors en sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau. [31]

1.10.3.4.1 Structure PV connectée directement au réseau

La figure 1.22 montre un onduleur associé à un circuit de commande qui est directement connectée aux modules photovoltaïques. La tension en sortie de ce dernier est transformée en une tension alternative de fréquence 50 Hz. Cette tension est transportée grâce à un bus alternatif vers un transformateur central qui l'élève au niveau désiré

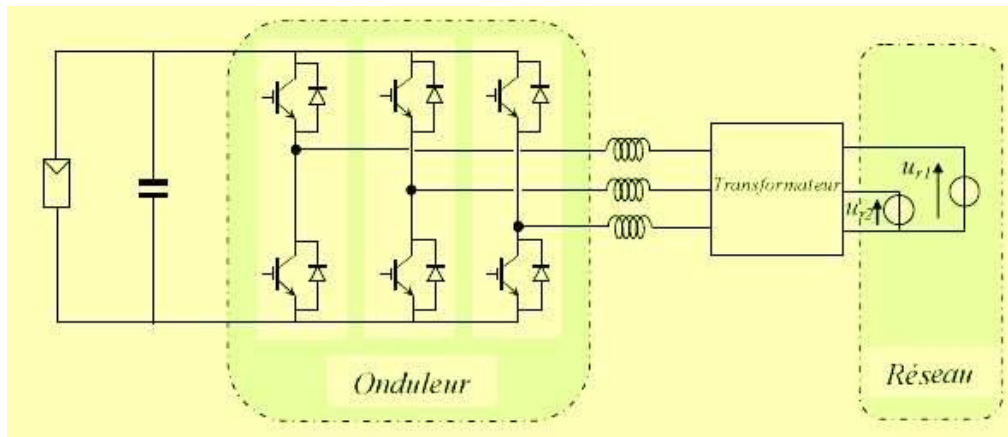


Figure 1.22 Schéma synoptique de la structure à convertisseur unique. [31]

Le faible niveau de tension dans le bus est l'avantage majeur de ce type de montage, puisqu'il assure la sécurité des personnels. Cependant, la distance entre le transformateur et le module doit être faible à cause du courant important qui traverse les câbles et qui génère des pertes joules. [31]

1.10.3.4.2 Structure avec hacheur et onduleur

La figure 1.23 représente un hacheur qui élève la tension en sortie de module PV et un onduleur pour la conversion de la tension continue en tension alternative et un transformateur pour élever la tension à la tension désirée (tension du réseau) et pour s'assurer l'isolation entre la partie « production » et la partie « utilisation ». L'avantage de ce système est que des batteries peuvent être facilement connectées au bus continu pour obtenir un système autonome. [31]

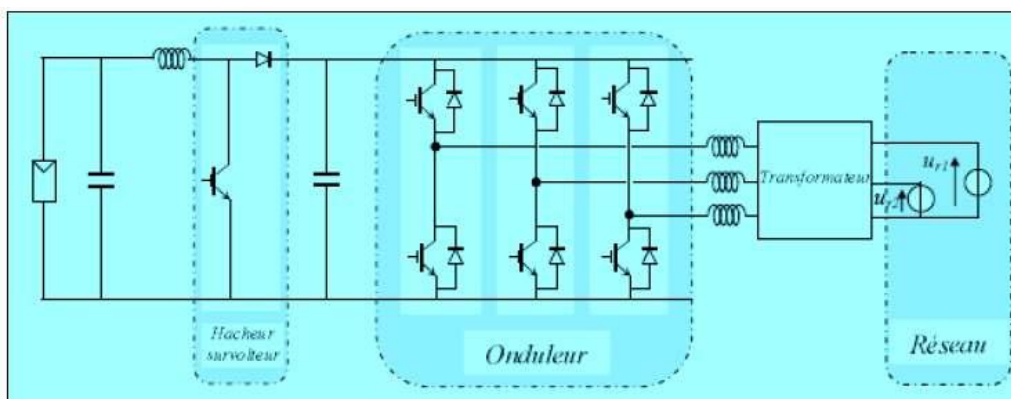


Figure 1.23 Schéma de la structure avec hacheur et onduleur. [31]

1.11 Batteries d'accumulateurs :

Pour qu'un système hors réseau fournisse de l'énergie à la demande et pas seulement en présence de soleil, il est nécessaire d'utiliser des batteries pour stocker l'énergie. Les batteries plomb-acide sont les plus courantes et se classent en deux types : plomb-calcium et plomb-antimoine. La recharge des batteries a été la première grande application du photovoltaïque, ce qui explique que la plupart des modules actuels délivrent un courant continu d'environ 12 volts. Les batteries nickel-cadmium sont également une option, notamment pour des environnements soumis à de grandes variations de température. Étant donné les fluctuations de l'énergie solaire, les batteries doivent être capables de supporter de nombreux cycles de charge et de décharge sans subir de dégradations. La profondeur de décharge permise pour une batterie varie selon son type. Par exemple, les batteries plomb-calcium conviennent pour des décharges inférieures à 20 % par cycle, tandis que les batteries nickel-cadmium et certaines batteries plomb-antimoine sont adaptées pour des décharges profondes dépassant 80 %.[12]

1.11.1 La capacité

La capacité d'une batterie est la quantité d'électricité qu'elle peut délivrer pendant une période de temps déterminée, en tenant compte du taux de décharge et de la température ambiante. La capacité diminue avec la température, avec des taux de décharge plus élevés et avec le vieillissement de la batterie. Elle s'exprime en A/H (ampère-heure).[12]

1.11.2 Rendement faradique (rendement en tension) :

Le rendement faradique est le rapport entre le courant fourni lors de la charge et celui restitué lors de la décharge. En ce qui concerne le rendement en tension il correspond au rapport entre la tension délivrée par la batterie lors de la décharge et la tension de charge.[12]

1.11.3 Profondeur de décharge maximum :

La profondeur de décharge maximale indique le pourcentage maximum de la capacité nominale au-delà duquel une décharge n'est plus recommandée. Dans les systèmes solaires, la décharge journalière moyenne représente le déficit entre la production et la consommation quotidiennes, ce qui s'applique également à la décharge saisonnière. Pendant l'hiver, la profondeur de décharge maximale, généralement entre 50 et 80% de la capacité selon les batteries au plomb-acide couramment utilisées dans les installations photovoltaïques (à

vérifier dans la notice du fabricant), ne doit pas être dépassée.[12]

1.11.4Durée de vie :

Elle est définie par le nombre de cycles de charge et décharge qu'elle peut effectuer tout en conservant sa capacité. Cela s'exprime en ampère-heure par cycle. La batterie STECO 3000 (voir la notice du fabricant en annexe) de 105 Ah sous 12V permet 30 000 ampère-heure par cycle, ce qui équivaut à 600 cycles à une profondeur de décharge de 50% ou 1000 cycles à une profondeur de décharge de 30%. La performance de cyclage dépend de la profondeur de décharge ; ainsi, pour une installation photovoltaïque, le taux de décharge quotidien ne devrait pas dépasser 10% de la capacité.[12]

1.11.5Taux d'autodécharge :

Le taux d'autodécharge représente le pourcentage d'énergie perdue par une batterie au repos. Un taux d'autodécharge élevé peut réduire les performances d'un système photovoltaïque. Ce taux dépend des matériaux utilisés pour les plaques positives et négatives de la batterie : les plaques en Pb calcium ont tendance à présenter un taux d'autodécharge plus faible que celles en Pb antimoine.[12]

1.11.6Coût :

Souvent, le prix joue un rôle crucial dans le choix d'une batterie. Malgré des performances supérieures des batteries Cad/nickel par rapport aux batteries pb/acide, celles-ci sont peu courantes dans les applications photovoltaïques traditionnelles en raison de leur coût initial élevé. En revanche, elles sont bien adaptées aux environnements à basse température.

Critères de sélection d'une batterie.

- Caractéristiques de charge, résistance interne
- Température du lieu d'installation
- Autonomie, profondeur de décharge maximale
- Taux de décharge maximal et taux d'autodécharge
- Périodicité et nature de la maintenance
- Durée de vie estimée
- Type : étanche ou non
- Poids, taille, densité de stockage d'énergie
- Visualisation aisée ou non du niveau d'électrolyte

- Etat des bornes de connexion (connexion aisée ou pas)
- Réputation du fabricant, coût et garantie.[12]

1.12 Conclusion :

Ce chapitre aborde la modélisation d'un générateur photovoltaïque et vision sur les systèmes photovoltaïque raccordé au réseau. Nous avons étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la composition de la cellule PV et ses différents paramètres. Ensuite nous avons présenté et expliquer les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque en mettant en lumière l'impact de certains paramètres sur ses performances

***Convertisseurs statiques
et ses commandes***

1.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque figure parmi les sources d'énergie renouvelable les plus prometteuses pour satisfaire les besoins énergétiques de notre société.

Les systèmes photovoltaïques sont généralement constitués de panneaux solaires, de convertisseurs statiques et de dispositifs de stockage d'énergie. Les convertisseurs statiques jouent un rôle essentiel en transformant et en régulant l'électricité générée par les panneaux solaires. Une fonctionnalité clé de ces convertisseurs est la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), qui optimise la production d'énergie des panneaux solaires.

Ce chapitre est consacré à l'étude des convertisseurs statiques, en mettant particulièrement l'accent sur les convertisseurs DC/DC, tels que le hacheur boost, ainsi que sur les convertisseurs DC/AC, et l'onduleur, qui sont couramment utilisés dans les systèmes photovoltaïques.

Ce chapitre permettra de mieux comprendre les convertisseurs statiques et leurs techniques de commande, qui jouent un rôle crucial dans l'optimisation de l'efficacité des systèmes photovoltaïques.

1.2 Convertisseurs statiques

Les convertisseurs sont des dispositifs permettant de transformer une tension continue provenant de panneaux solaires ou de batteries afin de l'adapter à des récepteurs nécessitant une tension continue différente ou une tension alternative. Leur étude est particulièrement intéressante, car ils sont largement utilisés dans la plupart des nouvelles sources de production d'énergie décentralisée, telles que l'éolien, le photovoltaïque ou les piles à combustible, qui sont connectées au réseau électrique.

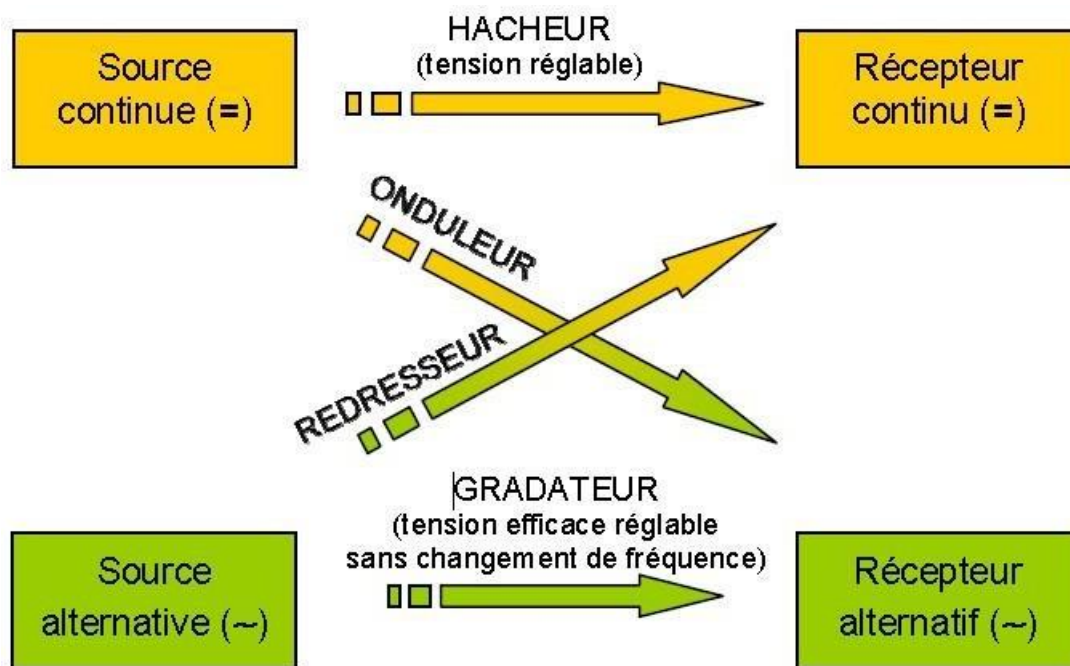


Figure 2.1 Différents types de convertisseurs statiques

1.2.1 Convertisseurs continu-continu (hacheurs) :

Le hacheur est un convertisseur qui transforme une source d'énergie continue à un certain niveau de tension (ou de courant) en une énergie continue à un niveau différent de tension (ou de courant). Il joue un rôle crucial dans le stockage de l'énergie produite par les panneaux solaires dans des batteries ou pour l'alimentation de charges nécessitant une alimentation continue. Composé de commutateurs, d'inductances et de condensateurs, le hacheur fonctionne en découpant une grandeur d'entrée continue (tension ou courant) pour fournir une sortie également continue ou avec une faible ondulation. [4,9,17]

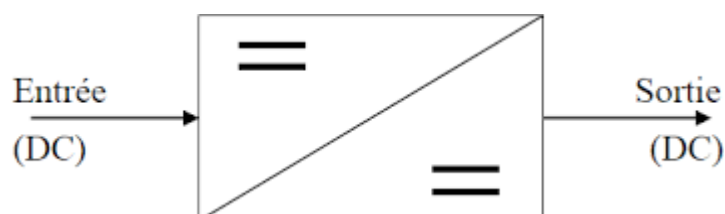


Figure 2.2 Symbole d'un convertisseur DC-DC.[17]

1.2.1.1 Type des hacheurs :

Il existe plusieurs types de hacheurs couramment utilisés dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et courants souhaités, ainsi que pour adapter les panneaux solaires aux différentes charges. Les trois principaux types de convertisseurs à découpage sont le Buck, le Boost et le convertisseur mixte.[17]

1.2.1.1.1 Hacheur Buck(abaisseur)

Il s'agit d'un convertisseur direct DC-DC, où la source d'entrée est une tension continue et la charge de sortie est une source de courant continu. L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor, car le courant reste toujours positif et les commutations doivent être contrôlées (au blocage et à l'amorçage).

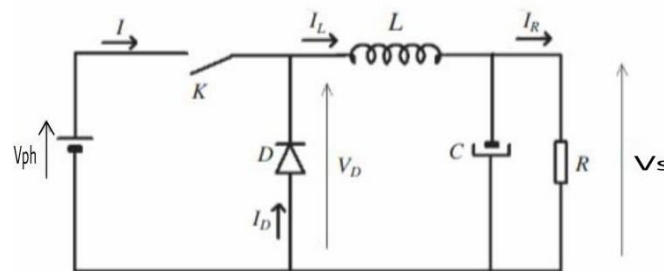


Figure 2.3 Schéma d'un hacheur Buck (abaisseur). [18]

Principe de fonctionnement

Le hacheur buck est un convertisseur permettant de réduire une tension d'entrée continue (DC) en une tension de sortie continue DC plus basse. Il utilise un interrupteur, souvent un MOSFET ou un transistor bipolaire, commandé par une onde de commande et commuté à une fréquence élevée. Cet interrupteur, généralement un MOSFET de puissance de canal N, est commandé à la fréquence de découpage $f=1/T$. Lorsque l'interrupteur est fermé pendant une durée αT la tension appliquée aux bornes de la diode est V_{ph} , ce qui permet à la source V_{ph} de fournir de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps $t \in [\alpha T, T]$ où l'interrupteur s'ouvre, l'énergie stockée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D, et la tension à ses bornes est nulle.

Les chronogrammes présentés dans la Figure 2.4 correspondent à un régime de conduction continue, indiquant que le courant ne repasse jamais par zéro.[18]

Pour établir la relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie, on considère que la

valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est égale à zéro :

$$v_5 = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} V_{ph} dt \quad (2.1)$$

$$v_s = a \cdot v_{ph} \quad (2.2)$$

A pertes minimales on a :

$$P = P_s \Leftrightarrow V_s \cdot I_s = V_{ph} \cdot I \Leftrightarrow I = \frac{V_s}{V_{ph}} I_s \Leftrightarrow I = \alpha \cdot I_s \quad (2.3)$$

Le rapport cyclique a est défini comme le rapport entre la durée (t_{on}) pendant laquelle l'interrupteur (K) est fermé, et la période totale (T)

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T}, 0 < \alpha < 1 \quad (2.4)$$

Donc le rapport cyclique s'égale

$$\alpha = \frac{V_s}{V_{ph}} = \frac{I_s}{I} \quad (2.5)$$

Dans les 2 modes de fonctionnement, on observe que la tension de la charge (V_o) est déterminée par le rapport cyclique (a). Par conséquent, pour ajuster la tension (V_o) il est nécessaire de modifier la valeur du rapport cyclique (a).

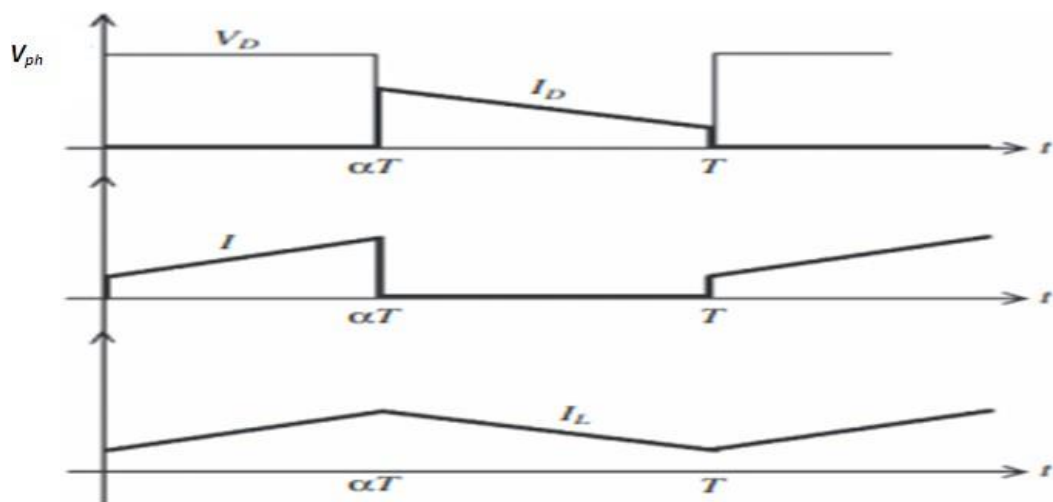


Figure 2.4 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Buck. [18]

1.2.1.1.2 Hacheur élévateur (Boost)

Un convertisseur Boost, également appelé hacheur parallèle, permet de transformer une tension continue en une tension continue de valeur plus élevée. Il peut être utilisé comme adaptateur source-charge lorsque le point de fonctionnement en couplage direct se situe à droite du MPP [20]. Ce type de convertisseur fonctionne comme une alimentation à découpage élévateur, fournissant une tension de sortie supérieure à la tension d'entrée.

La Figure 2.5 montre un système photovoltaïque adapté par un hacheur de type Boost alimentant une charge résistive R.

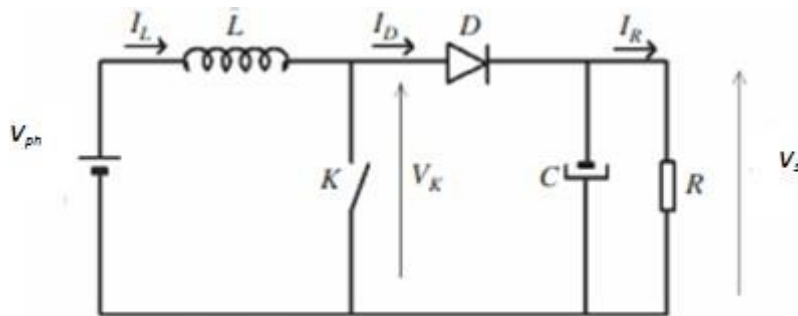


Figure 2.5 Schéma d'un hacheur Boost (élévateur). [20]

Lorsque l'interrupteur est fermé pendant une durée αT , le courant à travers l'inductance augmente de manière linéaire, et la tension aux bornes de K est nulle. Lorsque l'interrupteur s'ouvre durant l'intervalle $t \in [\alpha T, T]$, l'énergie stockée dans l'inductance maintient le flux de courant à travers la diode de roue libre D, ce qui entraîne $V_K = V_s$. En considérant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à

$$V_{ph} = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} V_s dt \quad (2.6)$$

$$V_{ph} = V_s(1 - \alpha) \frac{V_s}{V_{ph}} = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (2.7)$$

A pertes minimales on a :

$$P_s = P \Leftrightarrow V_c \cdot I_c = V_{ph} \cdot I \Leftrightarrow I_c = \frac{V_{ph}}{V_c} \cdot I_{pv} \Leftrightarrow I_c = (1 - \alpha) \cdot I_{ph} \quad (2.8)$$

Donc

$$(1 - \alpha) = \frac{V_{pv}}{V_s} = \frac{I_s}{I_{ph}} \quad (2.9)$$

On observe que la régulation de la tension de sortie (V_s) est régulée en ajustant le rapport cyclique (α).

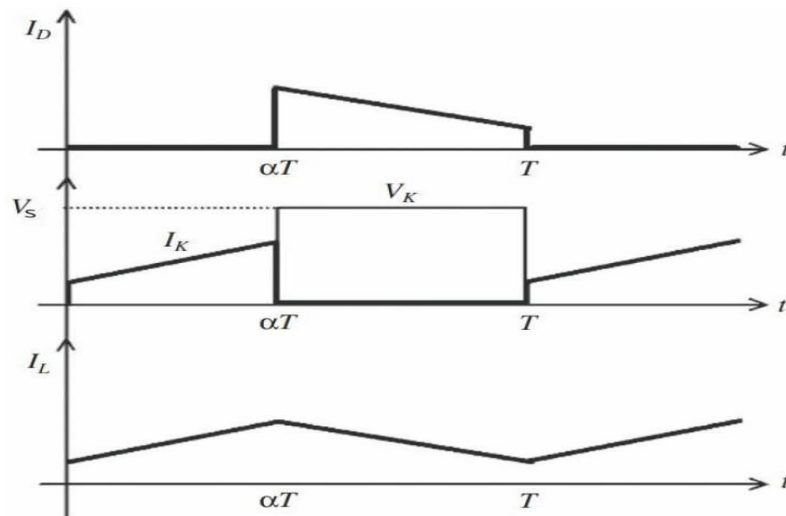


Figure 2.6 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Boost. [20]

1.2.1.1.3 Hacheur à stockage inductif ou BUCK-BOOST

Le hacheur buck-boost est un convertisseur DC-DC indirect utilisant le stockage inductif. Il utilise une source d'entrée en tension continue, équipée d'un filtrage capacitif en parallèle avec la source de tension, tandis que la charge de sortie est également continue, représentée par une source de tension avec un condensateur en parallèle avec une charge résistive. L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor, car le courant reste toujours positif et les commutations doivent être contrôlées au blocage et à l'amorçage. [9]

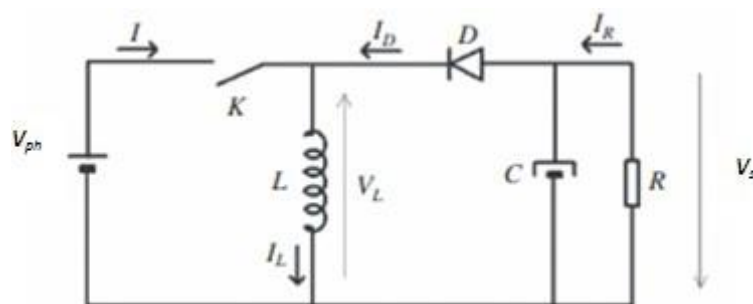


Figure 2.7 Schéma électrique d'un hacheur buck- boost. [9]

Principe de fonctionnement

Ce convertisseur permet de générer des tensions négatives à partir d'une tension positive. Son schéma de principe est illustré à la Figure 2.8. Lorsque l'interrupteur est fermé pendant une durée αT , le courant augmente de manière linéaire, et la tension V_L est égale à V_{pv} . Lorsque K s'ouvre, la diode prend le relais, et la tension V_L devient égale à $-V_o$. En considérant que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle, on obtient la relation suivante [9] :

Pour un rapport cyclique $\alpha > 0.5$, le hacheur buck-boost fonctionne comme un hacheur boost.

Pour un rapport cyclique $\alpha < 0.5$, le hacheur buck-boost fonctionne comme un hacheur buck.

$$V_{ph} \cdot \alpha \cdot T = V_s \cdot (1 - \alpha) \cdot T \quad (2.10)$$

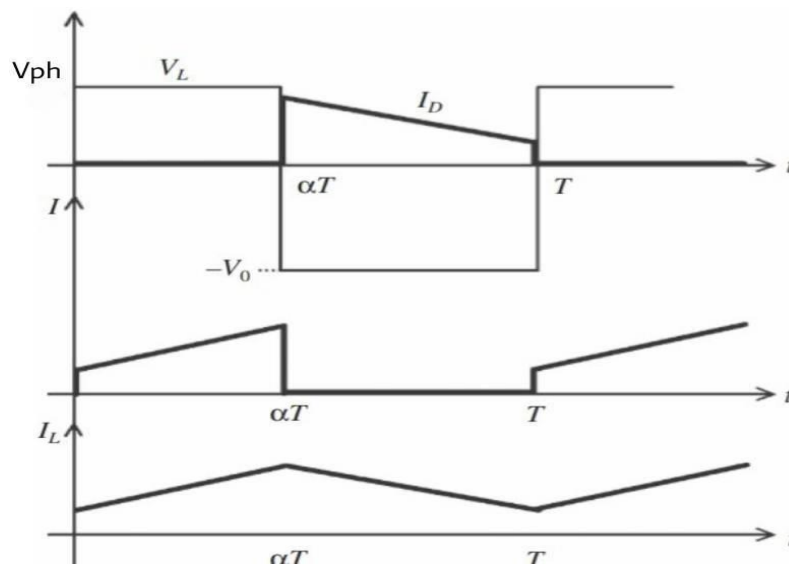


Figure 2.8 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Buck-Boost.[9]

1.2.1.2 Le choix de convertisseur DC/DC

Dans notre étude, nous avons choisis pour un convertisseur DC/DC de type élévateur (boost) en raison de sa structure simple et de son gain en tension supérieur à celui des autres convertisseurs pour un rapport cyclique donné. Ce type de convertisseur est particulièrement adapté comme adaptateur source-charge lorsque la charge nécessite une tension supérieure à celle fournie par le panneau.

1.2.1.2.1 Détermination des paramètres du hacheur Boost:

Les paramètres du hacheur Boost sont déterminés à l'aide des formules suivantes :

Le rapport cyclique α :

$$V_{ph} = V_s \frac{1}{1-\alpha} \Leftrightarrow \alpha = 1 - \frac{V_{pv}}{V_s} \quad (2.11)$$

Résistance R :

$$p = \frac{v_s^2}{R} \Leftrightarrow R = \frac{V_s^2}{P_s} \quad (2.12)$$

L'inductance L :

Nous aurons ainsi :

$$\Delta i_L = \frac{1}{2} (i_L(\alpha \cdot T_s) - i_L(0)) \quad (2.13)$$

Ainsi l'inductance (L) se calcule de la manière suivante :

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \Leftrightarrow V_{ph} = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.14)$$

En considérant $V_{L(t)} = V_{ph}$ durant le premier sous-intervalle, le courant i_L au cours de cette première période s'exprime comme suit :

$$i_L(\alpha \cdot T) = i_L(0) + V_{ph} L(\alpha \cdot T) \quad (2.15)$$

En remplaçant cette expression dans la première équation, on obtient :

$$\Delta i_L = \frac{1}{2} V_{ph} L(\alpha \cdot T) \quad (2.16)$$

Et on en déduit la formule utilisée pour calculer la valeur de L'inductance L Avec $f = \frac{1}{T}$

$$L = \frac{V_{pv}}{2 \cdot \Delta i_L \cdot f} \alpha \quad (2.17)$$

Capacité C :

Nous aurons ainsi :

$$i_s = C \frac{dV_s}{dt} \quad (2.18)$$

En calculant :

$$\int_{\Delta T}^T V_s = \frac{1}{C} \int_0^{\alpha T} i \, dt \quad (2.19)$$

Nous obtenons :

$$-2\Delta V_s = \frac{-1}{c} \frac{V_s}{R} \alpha T \Leftrightarrow c = \frac{V_s}{2\Delta V_s R f} \alpha \quad (2.20)$$

1.2.1.3 Simulation du hacheur Boost

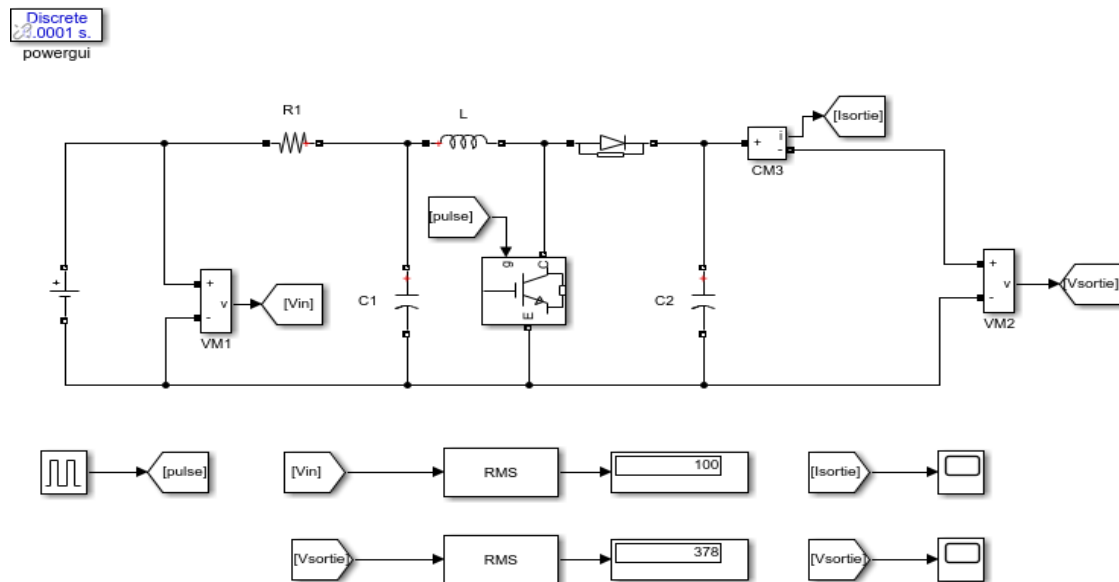


Schéma bloc de simulation du convertisseur élévateur :

Figure 2.9 Schéma bloc de simulation du convertisseur Boost.

• Résultats de la simulation :

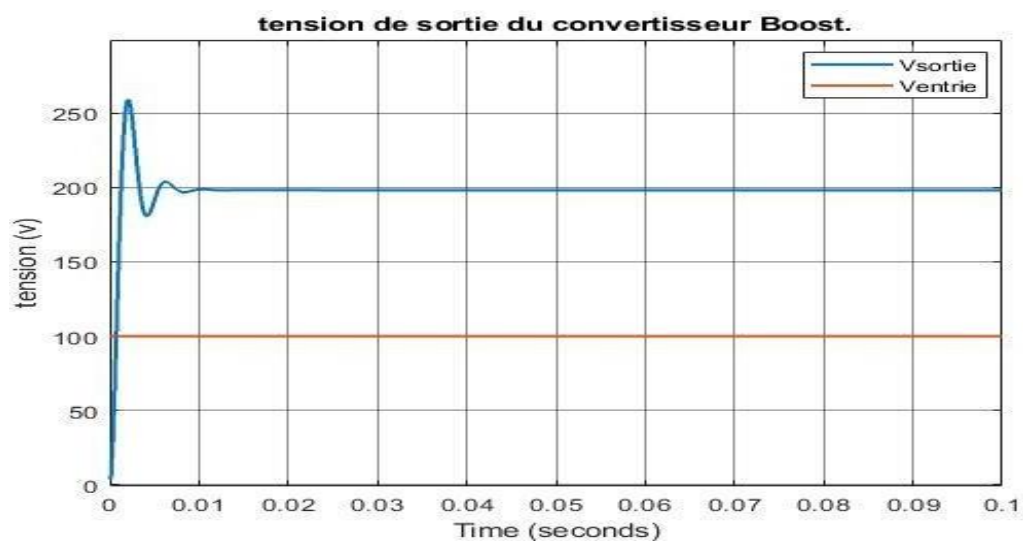


Figure 2.10 Tension de sortie du convertisseur Boost.

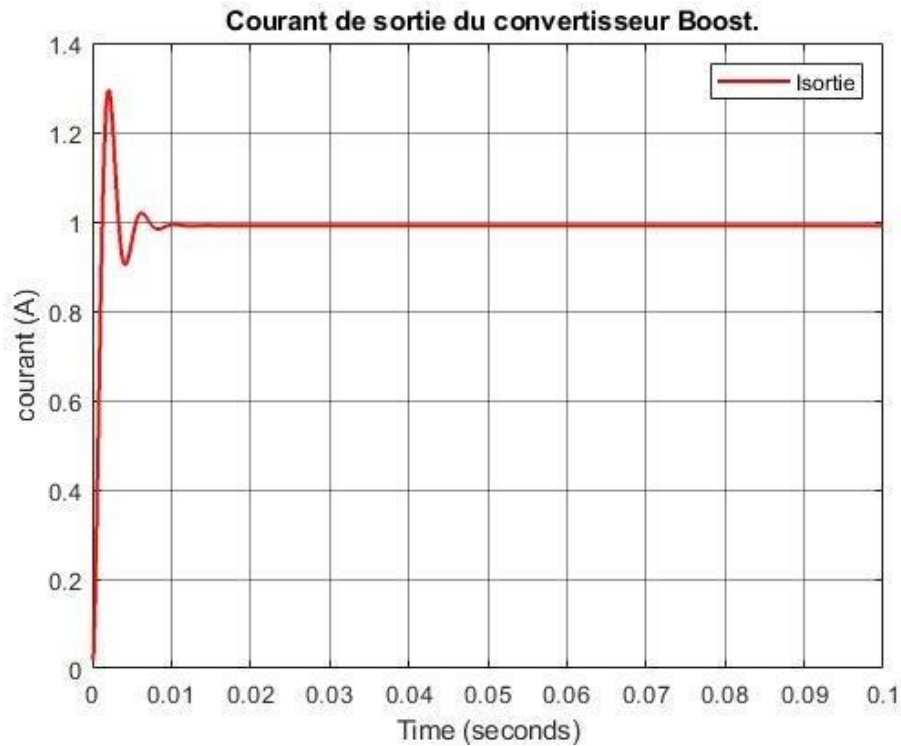


Figure 2.11 Courant de sortie du convertisseur Boost.

- **Interprétation des résultats :**

Ces figures illustrent les tensions d'entrée et de sortie d'un convertisseur boost ainsi que le courant de sortie du hacheur. Les résultats indiquent que la tension de sortie est plus élevée que la tension d'entrée, confirmant ainsi le bon fonctionnement du convertisseur boost.

1.2.1.4 Commande MPPT

Le MPPT est un algorithme intégré aux convertisseurs DC-DC, permettant d'optimiser la production d'énergie des panneaux solaires en ajustant la tension de charge en fonction de divers paramètres tels que le rayonnement solaire, la température ambiante et celle du panneau. Son objectif est d'extraire la puissance maximale du panneau solaire, garantissant ainsi une exploitation optimale de l'énergie produite. Cette technologie est particulièrement bénéfique pour l'alimentation d'équipements situés à distance. En général, un convertisseur DC-DC est intercalé entre le panneau photovoltaïque et la charge, et ajuste le rapport cyclique pour adapter le point de fonctionnement. [5-9-21]

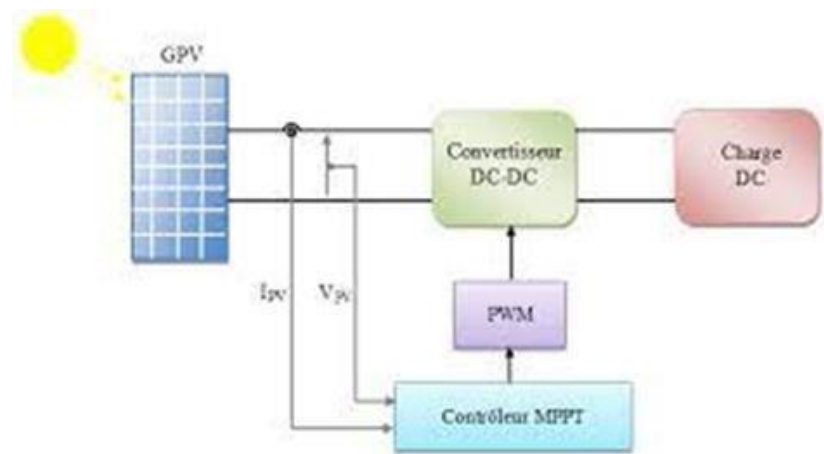


Figure 2.12 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec une commande MPPT

1.2.1.4.1 Principe de la MPPT

Le MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une technique utilisée pour optimiser l'énergie extraite des sources variables, comme dans les systèmes photovoltaïques (PV). Cette méthode repose sur le suivi de la tension et du courant d'un module solaire afin d'identifier le moment où la puissance maximale est atteinte. L'objectif principal du MPPT est de faire fonctionner le module PV à la tension optimale, correspondant au point de puissance maximale. Pour ce faire, le MPPT est un système électronique qui ajuste le point de fonctionnement des modules pour maximiser la puissance disponible. Il utilise un convertisseur DC-DC, qui transforme l'entrée DC d'un module PV en AC, puis la reconvertit en une tension et un courant DC différents. Un régulateur de charge solaire MPPT est essentiel pour tout système d'énergie solaire.

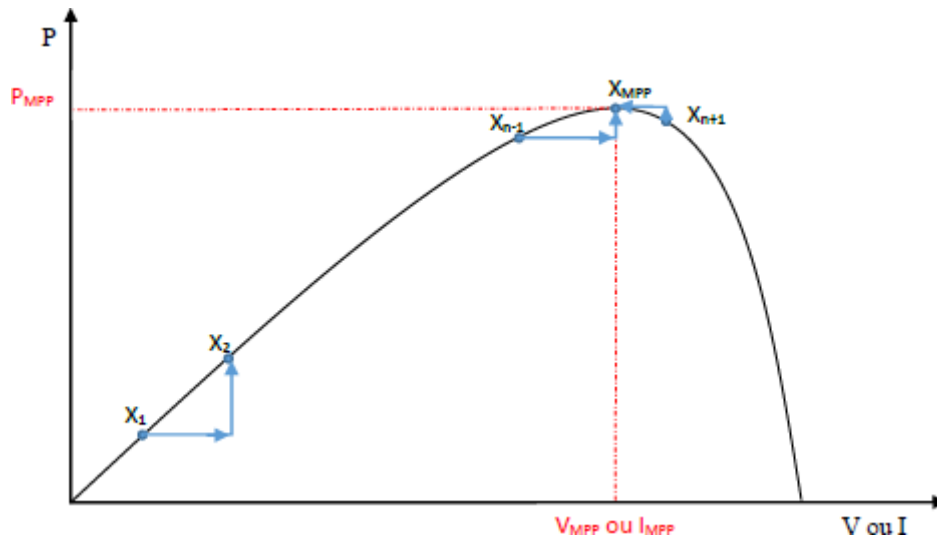


Figure 2.13 Schéma de principe du convertisseur MPPT

1.2.1.4.2 Les différentes techniques de MPPT

La littérature recense plusieurs types d'algorithmes permettant la recherche du point de puissance maximale :

- La méthode de perturbation et observation.
- La méthode incrémentation de la conductance.
- Méthode de capacité parasite.

Dans notre étude, nous nous concentrons sur la méthode de Perturbation et Observation (P&O), en raison de sa simplicité d'implémentation et de son bon rendement.

1.2.1.4.3 Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

La méthode P&O est une technique largement utilisée pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT). (MPPT).

La méthode P&O est une technique largement utilisée pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT). Elle est particulièrement appréciée pour sa simplicité, car elle ne requiert que la mesure de la tension de sortie (V_{pv}) et du courant de sortie (I_{pv}) du panneau solaire [22]. Son fonctionnement repose sur une perturbation de la tension de sortie du panneau, suivie de l'observation de son impact sur la puissance générée. En réponse, la méthode ajuste une tension de référence (V_{ref}) afin d'atteindre le point de puissance maximale [9].

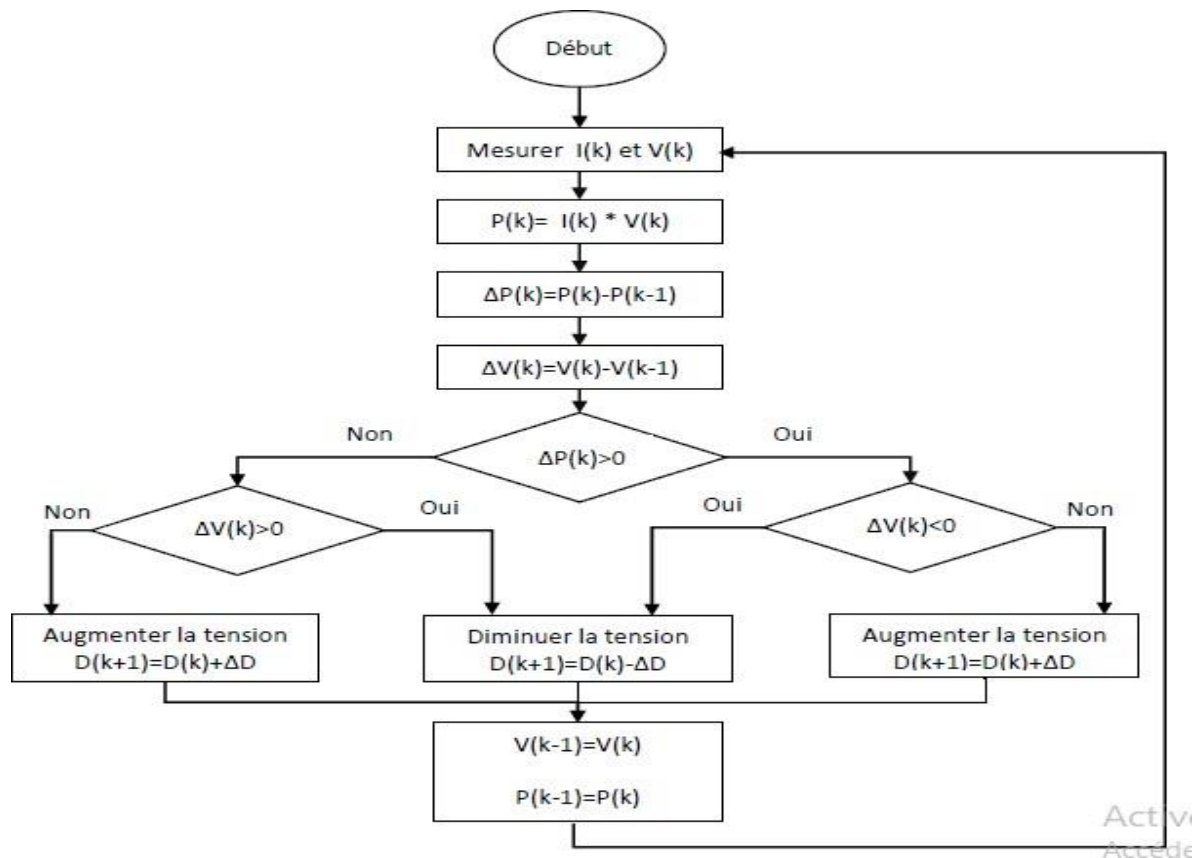


Figure 2.14 Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation P&O

Sur la Figure 2.14, on voit que si la tension de fonctionnement varie dans une direction donnée ce qui implique que la puissance augmente ($\Delta P > 0$), la variation doit alors se déplacer vers le point de fonctionnement (PPM). L'algorithme P&O continuera à observer la variation de la tension dans la même direction. Par contre, si la puissance diminue ($\Delta P < 0$), alors la variation est éloignée du point de fonctionnement du PPM.

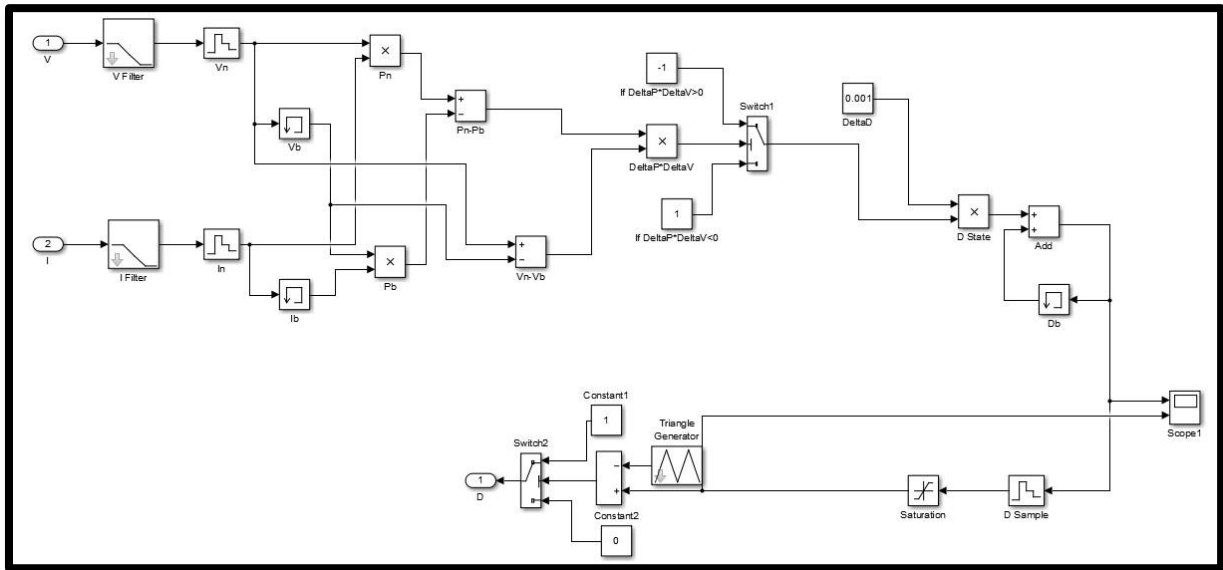


Figure 2.15 Schéma de simulation de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O)

1.2.2 Convertisseur DC/AC (onduleur)

Un onduleur est un convertisseur statique qui transforme l'énergie électrique continue en une énergie alternative utilisable pour le réseau électrique. Il est couramment utilisé dans les systèmes photovoltaïques pour convertir l'énergie électrique produite par les panneaux solaires en une énergie alternative, telle que le courant alternatif, permettant ainsi son injection dans le réseau. En outre, l'onduleur assure la régulation de la tension et de la fréquence de sortie en fonction des exigences du système.

Les onduleurs peuvent être classés en deux types selon le nombre de phases de leur sortie : onduleur monophasé et onduleur triphasé.

- **Un onduleur monophasé** convertit une tension continue en une tension alternative à une seule phase, idéal pour des charges plus légères. Il convient aux appareils domestiques, équipements de bureau, et petits serveurs.
- **Un onduleur triphasé** convertit une tension continue en une tension alternative, avec trois phases distinctes, couramment utilisé pour les systèmes industriels

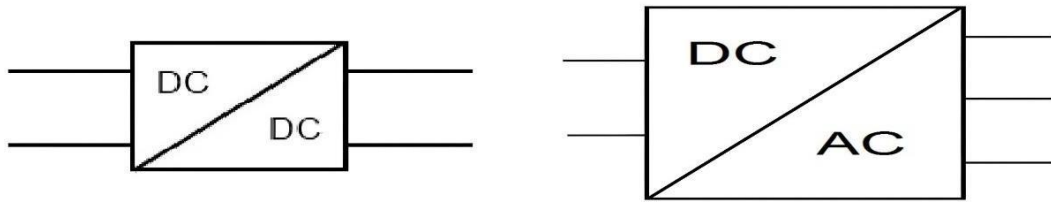


Figure 2.16 symbole de de convertisseurs DC/AC monophasé et triphasé

1.2.2.1 Choix de convertisseur DC/AC

Il existe une grande variété de convertisseurs DC/AC sur le marché, et leur choix dépend de plusieurs critères essentiels. Parmi eux, on retrouve la puissance de sortie requise, la tension d'entrée, le type d'onde de sortie, l'efficacité énergétique, la plage de température de fonctionnement et les dispositifs de protection.

Pour sélectionner le convertisseur DC/AC adapté, il est primordial de déterminer la puissance de sortie en fonction de la tension et du courant nécessaires. Il faut également prendre en compte la tension d'entrée de la source d'alimentation DC et choisir un type d'onde de sortie approprié à la charge à alimenter, qu'il s'agisse d'une onde sinusoïdale, carrée, etc.

L'efficacité énergétique est un autre facteur clé, car elle permet de limiter les pertes d'énergie inutiles lors de la conversion. Si le convertisseur doit fonctionner dans des conditions extrêmes, il est indispensable de s'assurer qu'il supporte des températures élevées ou basses.

Enfin, il convient de vérifier les dispositifs de protection intégrés, tels que la protection contre les surtensions, les surintensités, la surchauffe et les courts-circuits.

En résumé, pour choisir le convertisseur DC/AC le plus adapté à vos besoins, il est essentiel d'analyser ces différents critères, de consulter les spécifications techniques et de comparer les options disponibles sur le marché

1.2.2.2 Les onduleurs solaires

1.2.2.2.1 Types d'onduleurs solaires

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques fonctionnent de manière similaire aux onduleurs classiques, leur rôle principal étant de convertir le courant continu (DC) en courant alternatif (AC). Toutefois, leur particularité réside dans leur capacité à optimiser le point de fonctionnement du système. En effet, un générateur photovoltaïque, composé de plusieurs modules solaires, présente une courbe caractéristique non linéaire reliant le courant et la tension ($I(V)$). Par conséquent, il existe divers types d'onduleurs solaires adaptés à ces spécificités.[23]

1.2.2.2.2 Les onduleurs Autonomes

Un onduleur autonome (illustré dans la Figure 2.17) est un dispositif qui utilise des transistors ou des thyristors pour assurer la commutation, celle-ci étant contrôlée par des circuits externes. Contrairement aux onduleurs classiques, il fonctionne indépendamment du réseau électrique. Disponible en plusieurs puissances, allant de 100 W, suffisant pour alimenter un ordinateur portable, jusqu'à 10 kW, il repose sur des batteries pour stocker l'énergie. De plus, il intègre des contrôleurs de charge afin d'optimiser la durée de vie des batteries. [23-24].

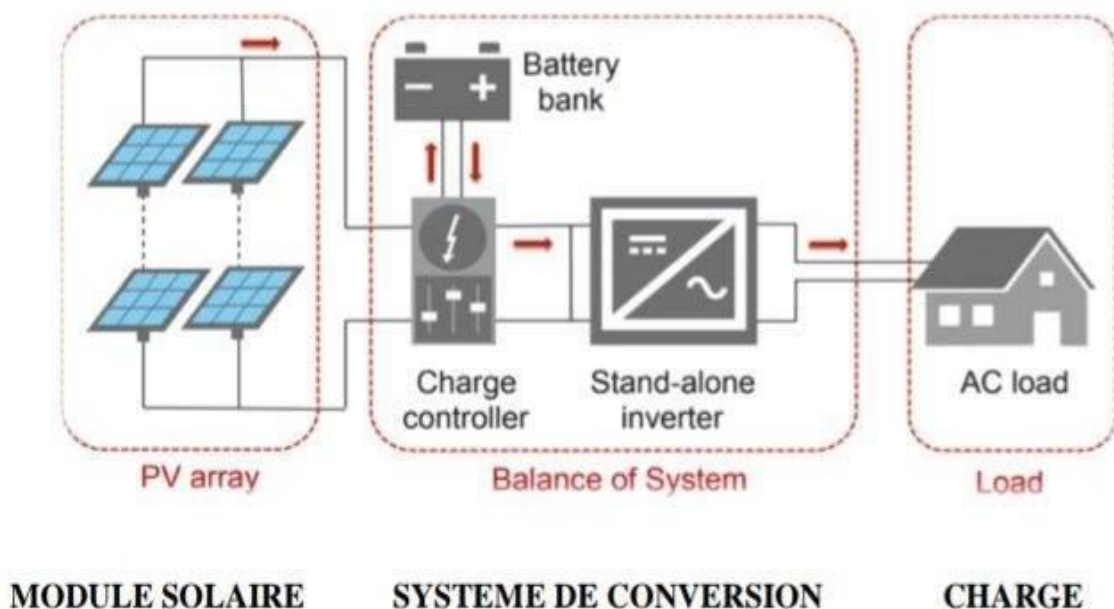


Figure 2.17 Onduleurs autonomes.[23]

1.2.2.2.3 Les onduleurs interconnectés au réseau

Les onduleurs connectés au réseau sont couramment utilisés dans les installations solaires de base. Faciles à installer, ils nécessitent uniquement une connexion aux panneaux solaires et au réseau électrique local. La mise en place d'un tel système est simple et rapide grâce à sa conception optimisée. Dès que les panneaux solaires commencent à produire du courant continu, l'onduleur le détecte automatiquement, sort du mode veille et passe en mode actif pour convertir l'énergie photovoltaïque en courant alternatif. [23].

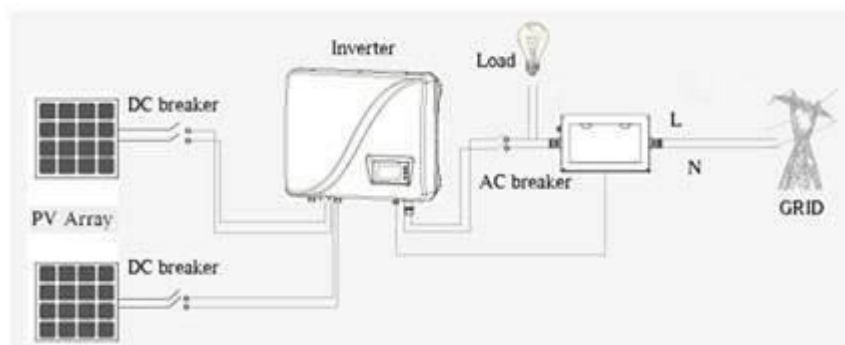


Figure 2.18 Les onduleurs interconnectés au réseau.[23]

1.2.2.2.4 Les onduleurs de pompage

L'onduleur de pompage (Figure 2.19) se distingue par sa facilité d'installation, sa durabilité et ses faibles coûts de maintenance, tout en étant respectueux de l'environnement. Grâce à la technologie MPPT intégrée, il maximise la puissance de sortie et optimise les performances de l'onduleur solaire alimentant la pompe à eau. De plus, son fonctionnement automatisé lui permet de démarrer et de s'arrêter en fonction de l'intensité du rayonnement solaire, garantissant ainsi une efficacité optimale tout au long de la journée. [23].



Figure 2.19 Onduleurs solaires pompage.[23]

1.2.2.3 Les structures de l'onduleurs

Les onduleurs triphasés sont constitués de trois bras, chacun intégrant deux interrupteurs fonctionnant de manière complémentaire afin d'éviter tout risque de court-circuit. Leurs cellules de commutation sont généralement composées de thyristors et de diodes ou de transistors et de diodes. [9]

Les onduleurs monophasés ils assurent la conversion du courant continu en courant alternatif pour les applications monophasées. Couramment utilisés dans les environnements domestiques et les petites installations commerciales, ils peuvent être connectés à des sources d'énergie renouvelable telles que les panneaux solaires. Leur conception repose sur un pont de diodes pour le redressement et un circuit d'onduleur dédié à la conversion en courant alternatif.

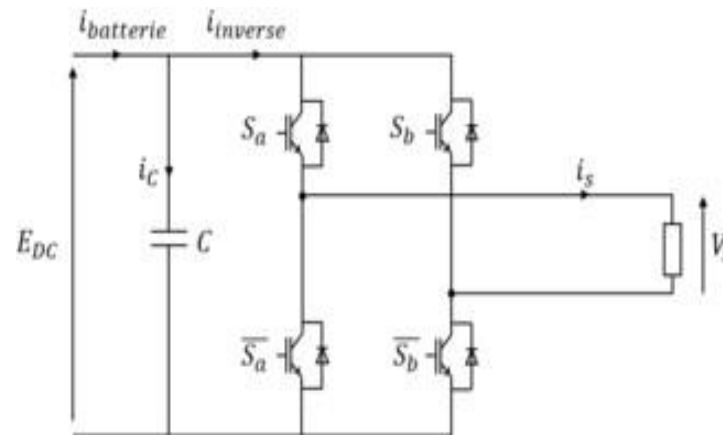


Figure 2.20 Structure d'onduleur monophasé. [9]

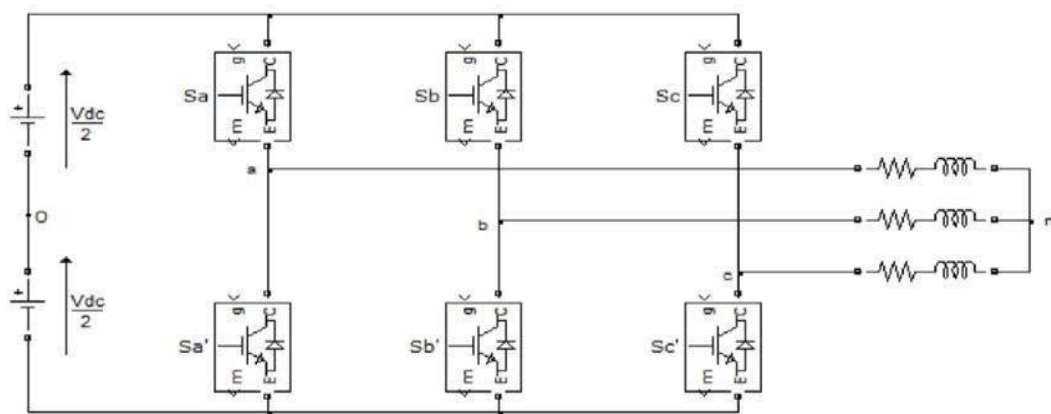


Figure 2.21 Structures d'onduleurs triphasé. [9]

1.2.2.4 La Modulation de largeur d'impulsion MLI

Les différentes techniques de modulation de largeur d'impulsion sont utilisées pour réguler la tension de sortie de l'onduleur et façonner les formes d'onde du courant. Leur principal objectif est de générer une tension de sortie variable avec une composante fondamentale maximale tout en minimisant la distorsion harmonique totale.

Ces techniques ont fait l'objet de nombreuses études au fil des décennies afin d'optimiser la génération de tensions et de courants sinusoïdaux. Parmi elles, la modulation de largeur d'impulsion se distingue comme la méthode la plus efficace pour le contrôle des onduleurs, permettant une meilleure neutralisation des ondulations de sortie.[25]

1.2.2.4.1 Principe de la modulation de largeur d'impulsion

La conversion du courant continu en courant alternatif est réalisée grâce aux commutations des interrupteurs de l'onduleur, qui établissent temporairement des connexions entre les bornes de la source d'alimentation continue et les lignes de la charge triphasée alternative.

Le transfert d'énergie est régulé par le rapport cyclique, c'est-à-dire le ratio entre les périodes d'ouverture et de fermeture de chaque interrupteur. Ce contrôle est assuré par la modulation de largeur d'impulsions (MLI).

Cette technique repose sur la comparaison d'un signal de référence, également appelé modulatrice d'amplitude A_r et de fréquence f_r , avec un signal porteur d'amplitude A_p et de fréquence f_p beaucoup plus élevée. [25]

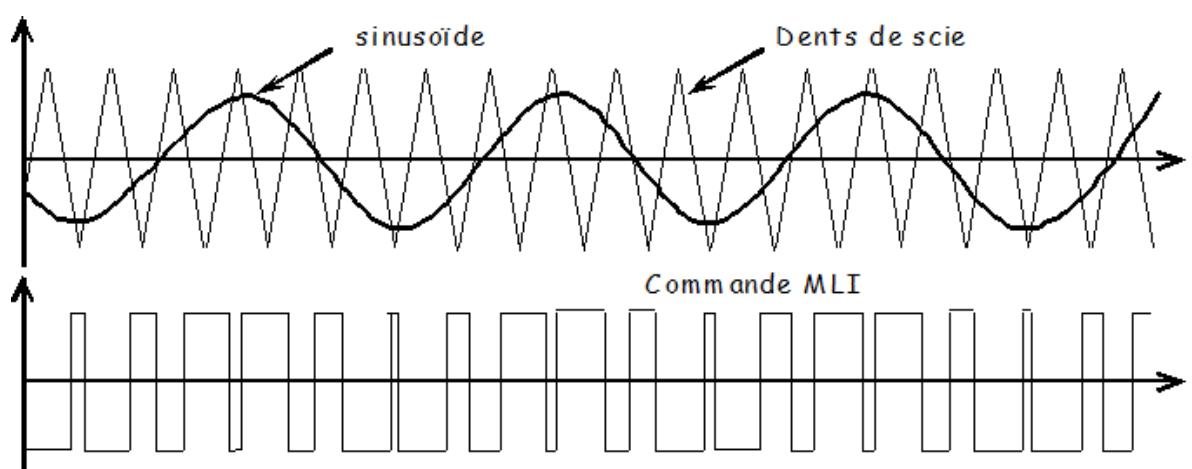


Figure 2.22 MLI à porteuse en dents de scie. [25]

Tableau 2-1 Caractéristiques des commandes par MLI [25]

Commande	Technique de commande	Avantages	Inconvénient
MLI	Adopte une fréquence de commutation suffisamment élevée par rapport à la fréquence maximale du signal de sortie souhaité et reproduit sa valeur moyenne à chaque période de commutation. Cela est réalisé en ajustant la durée d'application des tensions positives et négatives par rapport au point milieu du bus continu.	Réduit les harmoniques indésirables dans les courants générés par l'onduleur - Robustesse - Faible effort de commande - Grande fiabilité	- Augmente les pertes par commutation qui sont dues à la haute fréquence de commutation - Faiblesse pour des systèmes avec bruit et pour des paramètres du système variable - Nécessité d'un modèle mathématique. - Absence de contrôle sur les ondulations de courant.

1.2.3 Filtrage

Le filtre utilisé est un filtre passe-bas, dont la fonction principale est de réduire les ondulations de la tension et du courant générés par l'onduleur. Son schéma est présenté dans la Figure 2.23

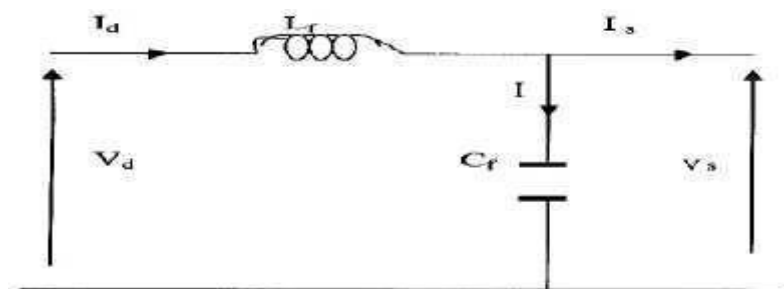


Figure 2.23 Schéma du filtre [25].

Les équations du filtre sont données par :

$$\begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{V_d - V_s}{L_f} \\ \frac{dV_s}{dt} = \frac{I_d - I_s}{C_f} \end{cases}$$

La fonction de transfert correspondante s'exprime comme :

$$F(s) = \frac{V_s(s)}{V_d(s)} = \frac{1}{L_f C_f \cdot s^2 + 1}$$

Cette fonction de transfert est du deuxième ordre dont la fréquence de coupure est :

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}}$$

Ce filtre a pour rôle d'atténuer les harmoniques d'ordre supérieur présentes dans la tension générée par l'onduleur. Le condensateur C_f contribue à la production de la puissance réactive requise et peut également absorber le courant négatif renvoyé par la charge. [25]

1.2.4 La stratégie de commande DQ

La référence dq est une méthode largement employée pour le contrôle des tensions et des courants dans les systèmes électriques. Elle permet de transformer les grandeurs triphasées en un référentiel à deux axes, (d et q). En régulation de tension, elle établit une consigne de tension de référence, comparée à la tension réelle afin d'ajuster les paramètres de contrôle. De même, en régulation de courant, elle définit une consigne de courant de référence, comparée au courant mesuré pour affiner la régulation. L'adoption de cette approche permet d'optimiser les performances du système, d'assurer sa stabilité et de répondre aux exigences spécifiques de l'application.[26]

1.2.5 Régulation des courants des boucles internes

Dans le cadre de l'application de la commande MLI, un régulateur de type PI a été utilisé pour assurer la régulation de la boucle de courant. Cette régulation est illustrée dans la Figure 2.24.

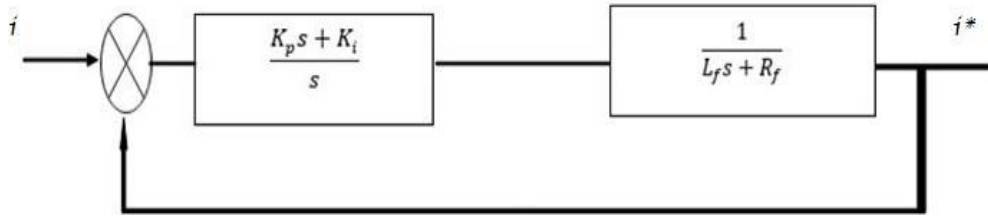


Figure 2.24 Schéma de la boucle interne du courant

En boucle fermée, la fonction de transfert obtenue est la suivante :

$$\frac{i}{i^*} = \frac{k_p \left(s + \frac{k_i}{k_p} \right)}{L_f \left(s^2 + \frac{R_f + k_p}{L_f} s + \frac{k_i}{L_f} \right)} \quad (2.21)$$

Avec i et i^* représentant respectivement le courant de sortie de l'onduleur et le courant de référence. En le comparant à la fonction de transfert standard, qui s'exprime sous la forme suivante :

$$F(s) = \frac{2\xi W_n \cdot s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi W_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (2.22)$$

Les paramètres du régulateur de courant obtenus sont les suivants :

$$k_{pc} = 2\xi \omega_n^2 \cdot l_f - R_f \quad k_{ic} = L_f \omega_n^2 \quad \text{avec} \quad \xi = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

1.2.6 Boucle de régulation de tension du bus continu

L'expression du courant traversant le condensateur C_{dc} est donnée par l'équation suivante :

$$i_{dc} = C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt}$$

En appliquant la transformée de Laplace, nous obtenons l'expression suivante :

$$i_{dc} = C_{dc}$$

Ce qui nous donne

$$V_{dc} = \frac{1}{C_{dc}s} i_{dc}$$

L'expression en boucle fermée obtenue s'écrit comme suit :

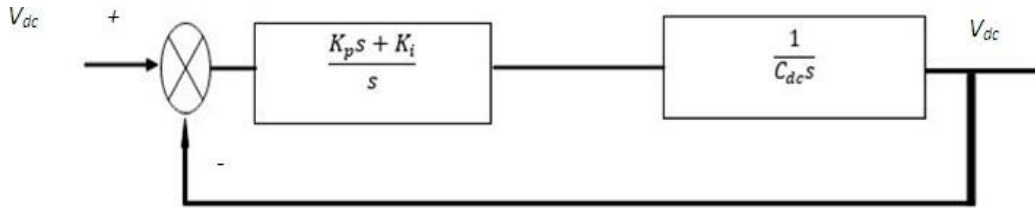


Figure 2.25 Schéma de la boucle externe de la tension

La fonction de transfert du régulateur nommé Cv s'écrit comme suite :

$$Cv = \frac{U_{dc}}{V_{dc}} = k_{pv} \frac{s + \frac{k_{iv}}{k_{pv}}}{s} \quad (1.23)$$

En calculant la fonction de transfert en boucle fermée, nous obtenons l'expression suivante :

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = 2\xi\omega \frac{s + \frac{\omega}{2\xi}}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} = \frac{\frac{k_{pv} \cdot s + k_{iv}}{c_{dc}}}{s^2 + \frac{k_{pv}}{c_{dc}}s + \frac{k_{iv}}{c_{dc}}} \quad (1.24)$$

Par identification, nous trouvons :

$$K_{pv} = 2\xi\omega C_{dc} \quad K_{iv} = \omega^2 * C_{dc}$$

1.2.7 La découplage Dq pour tension et courant

Un système monophasé peut être directement converti en un repère $\alpha\beta$ sans nécessiter de transformation matricielle. Une variable imaginaire est générée en décalant le signal initial (tension ou courant) de 90 degrés. Ainsi, le signal d'origine et son équivalent imaginaire représentent respectivement la tension et le courant de charge dans les coordonnées $\alpha\beta$.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{rel}(\omega t + \varphi) \\ V_{img}(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{rel}(\omega t + \varphi) \\ I_{img}(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

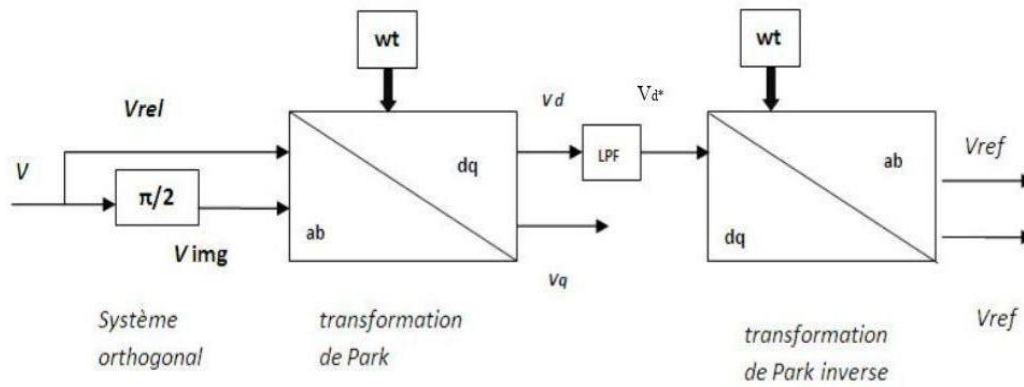


Figure 2.26 La génération de signal de référence utilisant la transformation d-q

Pour obtenir

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) \\ -\cos(\omega t) & \sin(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{rel} \\ V_{img} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) \\ -\cos(\omega t) & \sin(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{rel} \\ I_{img} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

De V_d et V_q , nous pouvons dériver fondamental actif, fondamental réactif, harmonique actif, et réactif harmonique en utilisant des filtres.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d^* & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ref} \\ V_{refimg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) \\ -\cos(\omega t) & \sin(\omega t) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

À partir de V_d et V_q , il est possible d'extraire la composante fondamentale active, la composante fondamentale réactive, ainsi que les composantes harmoniques active et harmonique réactive en utilisant des filtres.

$$\begin{bmatrix} V_{ref} \\ V_{refimg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) \\ -\cos(\omega t) & \sin(\omega t) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_d^* + V_{dref} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

donc le signal de référence est

$$V_{ref}(\omega t) = \sin(\omega t) (v_d^* + V_{dc}) \quad (2.32)$$

La tension de référence générée est utilisée pour devenir la référence de la commande MLI.

1.3 Conclusion

Ce chapitre présente un aperçu des convertisseurs statiques et de leurs méthodes de commande. Il met en avant les convertisseurs DC/DC et DC/AC, ainsi que la régulation des courants et des tensions. Ces éléments offrent une compréhension approfondie des principes fondamentaux de ces convertisseurs et des stratégies de contrôle assurant leur bon fonctionnement.

Simulation Et Evaluation Des Résultats

3.1 Introduction

Le système photovoltaïque Il comprend des composants tels que les panneaux photovoltaïques, un contrôleur MPPT, un hacheur boost, un onduleur et un filtre de sortie. Ces composants travaillent ensemble pour maximiser la production d'électricité, convertir le courant continu en courant alternatif et garantir une alimentation électrique de qualité. Des simulations sont effectuées pour optimiser les performances du système.

3.2 Description du système photovoltaïque global :

La figure 3.1 représente le schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque. Ce système est divisé en deux parties : la partie puissance et la partie commande. La partie commande comprend plusieurs éléments essentiels tels que le panneau photovoltaïque, le contrôleur MPPT, le hacheur, l'onduleur et le filtre . Ces éléments interagissent pour assurer la conversion efficace de l'énergie solaire en électricité utilisable et garantir le bon fonctionnement du système

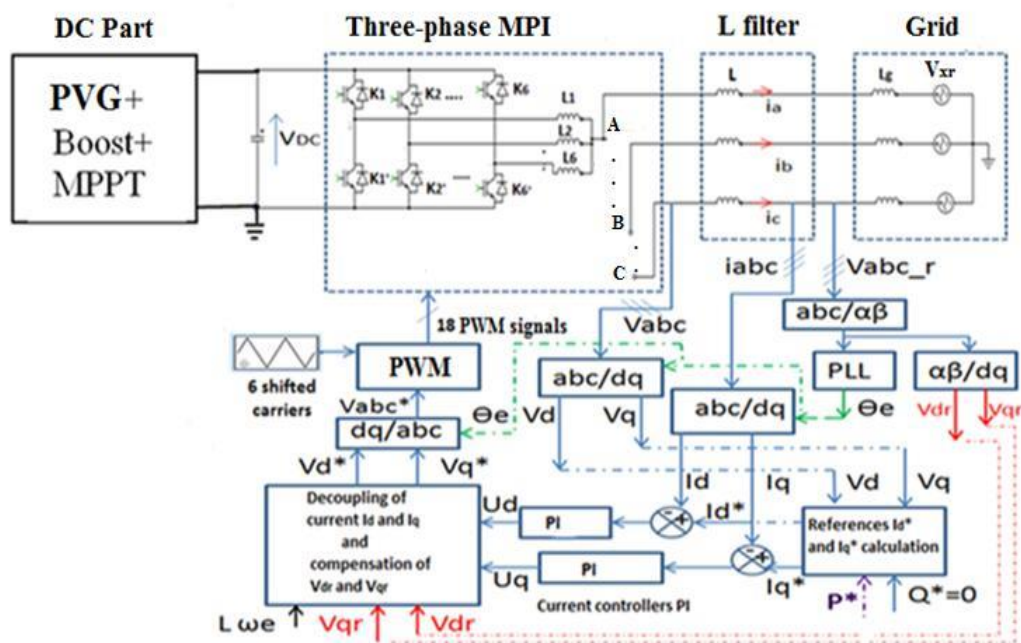


Figure 3.1 Schéma synoptique de l'installation

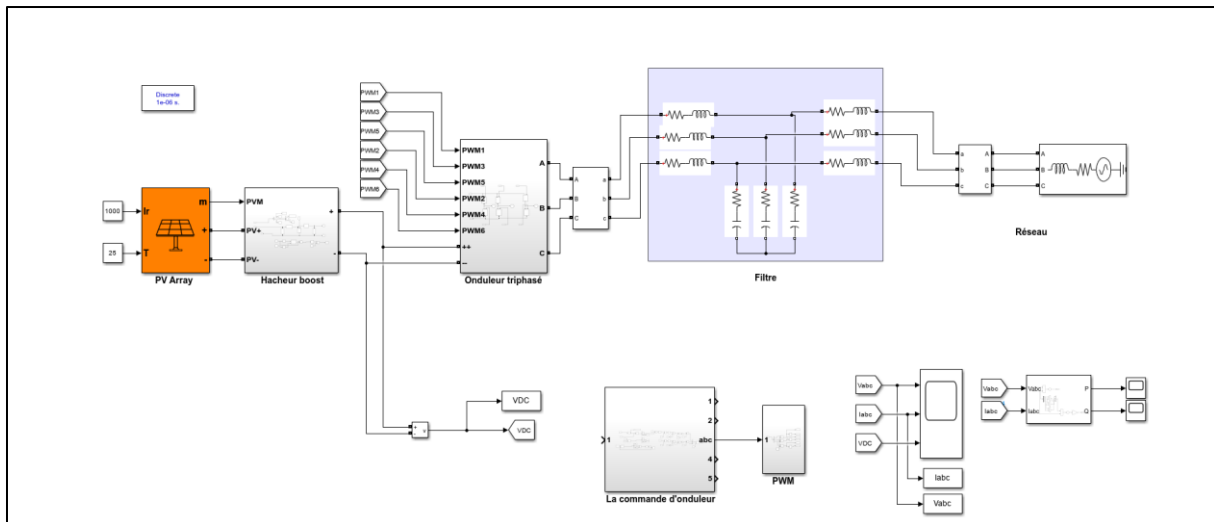


Figure 3.2 Schéma de la simulation du système photovoltaïque

Nous allons fournir dans ce qui suit une description sommaire de chaque bloc composant ce système.

3.2.1 Le panneau photovoltaïque :

3.2.1.1 Les caractéristiques électriques du panneau PV :

Courbes courant-tension et puissance-tension du panneau PV :

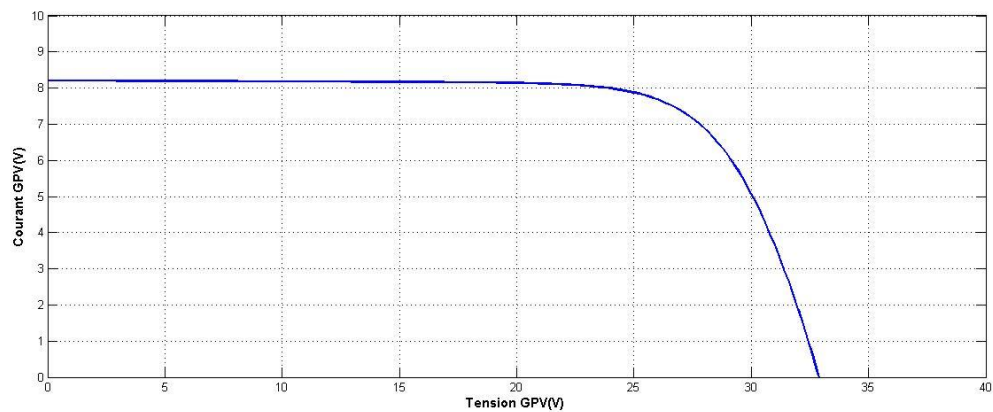
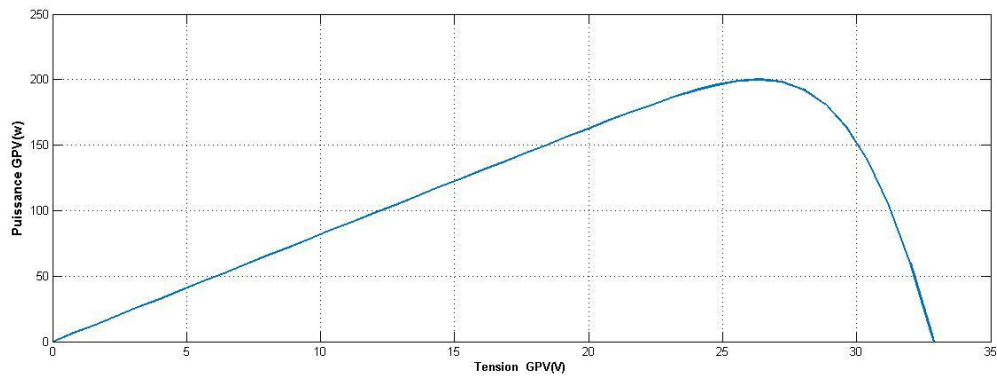
Les courbes caractéristiques d'un panneau solaire photovoltaïque (PV) représentent comment le courant et la puissance produits par le panneau varient en fonction de la tension appliquée. Elles permettent de voir comment le courant évolue en fonction de la tension, du court-circuit (tension nulle, courant maximum) jusqu'au circuit ouvert (courant nul, tension maximale). Ces courbes sont établies en prenant en compte des conditions ambiantes spécifiques, comme une température de 25°C et une irradiation solaire de 1000W/m². Elles servent de référence pour évaluer les performances du panneau PV dans des conditions standardisées

Simulation du générateur photovoltaïque KC200GT :

Nous avons choisi le module KC200GT composé de 54 cellules en silicium monocristallin connectées en série ayant une puissance maximale de 200.143w est considéré dans les conditions standards $G=1000\text{w/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$. Pour réaliser la modélisation de ce module, nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation

Tableau 3.1 Paramètres du module PV KC200GT aux conditions standards [4]

I_{mp}	7.61 A
V_{mp}	26.3 V
$P_{max,e}$	200.143 W
I_{sc}	8.21 A
V_{oc}	32.9 V
K_V	-0.1230 V/K
K_I	0.0032 A/K
N_s	54

Figure 3.3 Caractéristiques $I = f(V)$ du panneau PV
(température=25°C, insolation=1000w/m²)Figure 3.4 Caractéristiques $P = f(V)$ du panneau PV
(Température=25°C, insolation=1000W/m²)

Interprétation des résultats :

D'après cette caractéristique on cite :

A. Tension de circuit ouvert V_{CO} (pour $I_{CO} = 0$)

La Tension de circuit ouvert V_{CO} du panneau est égale à : 32.9 volts

On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes du panneau PV, cette valeur ne varie presque pas avec l'intensité lumineuse,

B. Courant de court-circuit I_{CC} (pour $V_{CC} = 0$)

le courant I_{CC} du panneau est égale à : 8.21A

Il est directement proportionnel à l'éclairement G (W / m^2), à la température ambiante,

On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes du panneau.

C. La puissance maximale

La puissance maximum P_{max} correspondrait à la valeur : 200 Watt. (Illustré dans Figure 3.4)

3.2.1.2 Fonctionnement dans des conditions environnementales stables :

Pour cette série de simulations, les paramètres température T et d'ensoleillement G sont maintenus constamment égaux aux valeurs d'essais standards qui sont respectivement $T=25^{\circ}C$ et $G=1000 W/m^2$. L'intérêt majeur sera focalisé sur les ondulations au niveau de la puissance et de la tension.

3.2.1.3 Résultats de la simulation à la sortie du GPV :**3.2.1.3.1 L'influence de l'éclairement solaire sur le fonctionnement du panneau PV:**

L'énergie électrique/ produite par un panneau PV dépend de l'éclairement qu'il reçoit sur sa surface. La figure suivante (Figure 3.5) représente la caractéristique courant-tension d'un panneau PV solaire en fonction de l'éclairement, à une température constante $25^{\circ}C$. On remarque que la tension V_{max} correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant I_{max} qui augmente fortement avec l'éclairement (Figure 3.7). Donc la puissance augmente aussi (Figure 3.6).

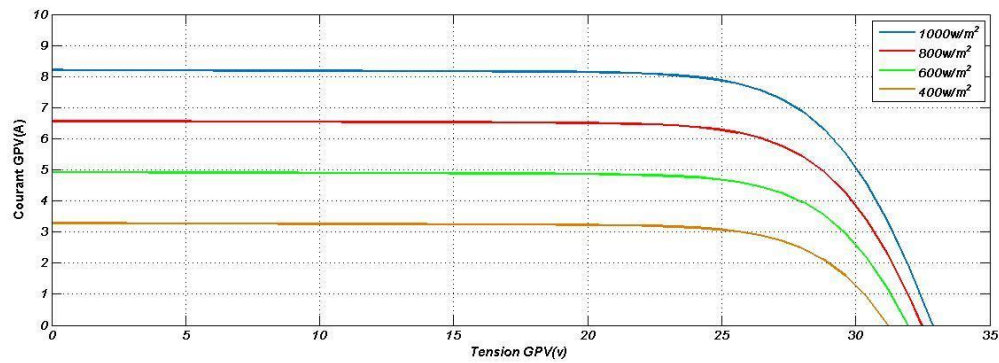


Figure 3.5 Caractéristiques Courant-Tension pour différents éclaircements

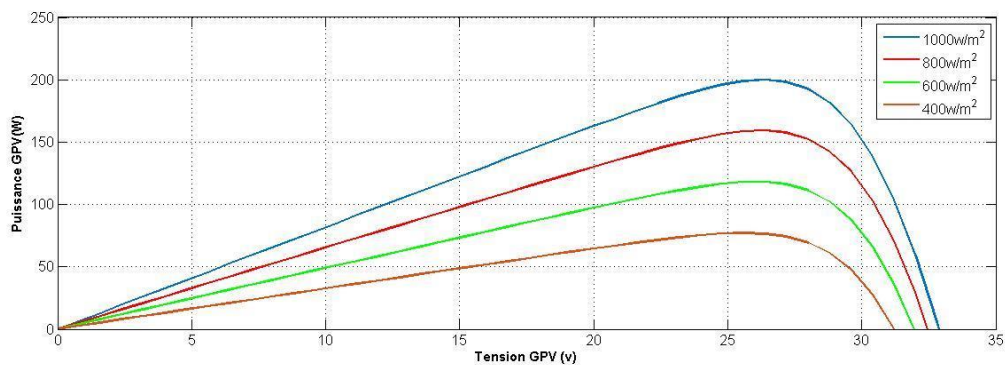


Figure 3.6 Caractéristiques Puissance Tension pour différents éclaircements

3.2.1.3.2 L'influence de la température sur le fonctionnement du panneau PV :

Les caractéristiques électriques du panneau PV dépendent de la température. Les courbes suivantes représentent l'évolution du courant et de la tension ainsi que de la puissance en fonction de la température, les autres conditions extérieures restant fixes :

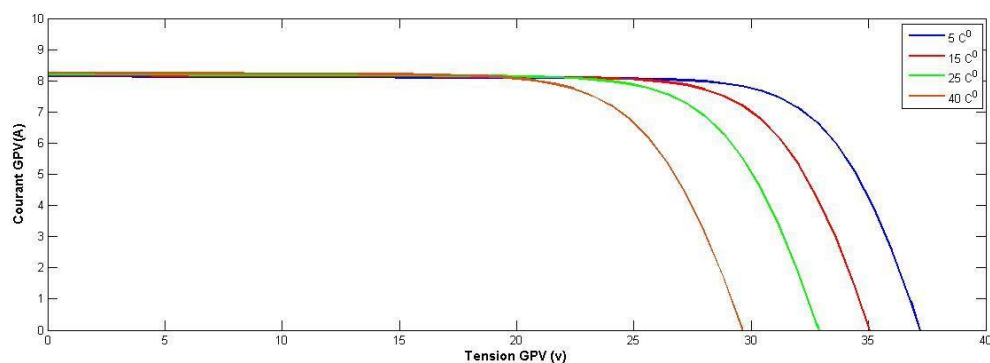


Figure 3.7 Caractéristiques Courant-Tension pour différentes températures

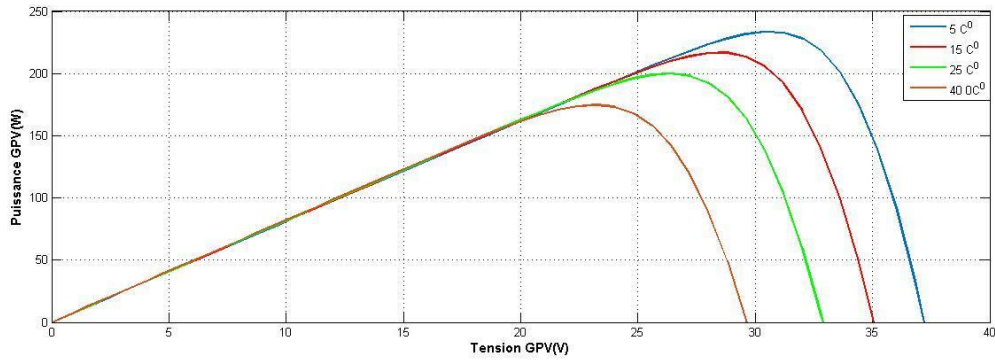


Figure 3.8 Caractéristiques Puissance–Tension pour différentes températures

3.2.2 Le hacheur boost :

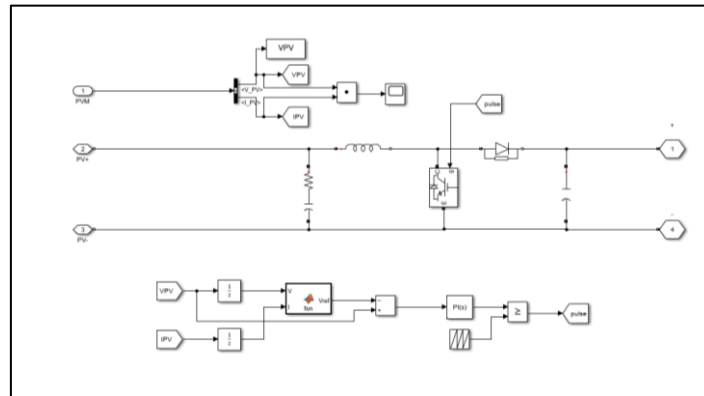


Figure 3.9 schéma de simulation d'Hacheur boost avec la commande MPPT

Les valeurs des composants utilisées sont :

Tableau 3.2 les valeurs des composants d'hacheur boost

C1	C2	L
1000 μ F	3200 μ F	1.5 mH

Nous utilisons la commande MPPT P&O comme un commande d'hacheur boost pour un bon fonctionnement et bon résultat parce qu'il est très simple et plus efficacité, que nous avons déjà modélisé en MATLAB SIMULINK (illustré dans la Figure 2.15) avec la commande MLI (La fréquence de générateur triangulaire égale à 25kHz).

3.2.3 Onduleur triphasé :

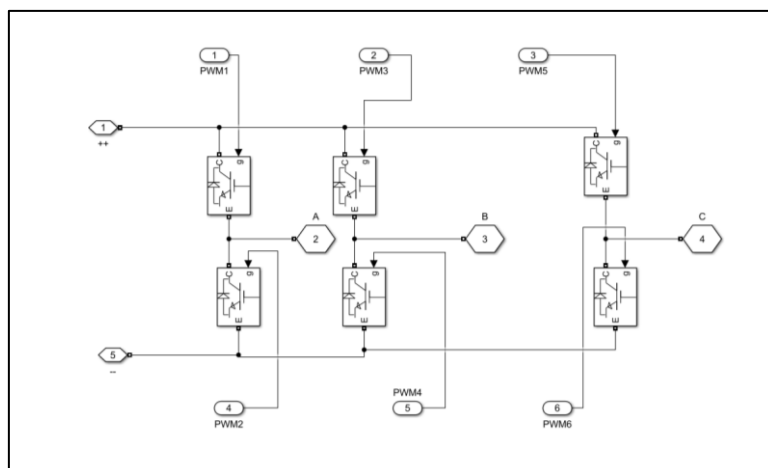


Figure 3.10 modèle 'MATLAB SIMULINK' onduleur triphasé

Nous avons choisi d'utiliser la commande MLI (Modulation de Largeur d'impulsion) pour obtenir un fonctionnement efficace et satisfaisant, car elle est à la fois simple et efficace. Nous avons déjà réalisé un modèle de cette commande dans MATLAB SIMULINK, comme illustré dans la Figure 3.10. La fréquence du générateur triangulaire utilisé dans la commande MLI est de 25 kHz. Nous avons également mis en place des boucles de régulation pour les courants et les tensions en utilisant des références dq et utilisant le circuit de filtrage LCL pour filtrer les harmoniques et garder la fréquence à 50Hz

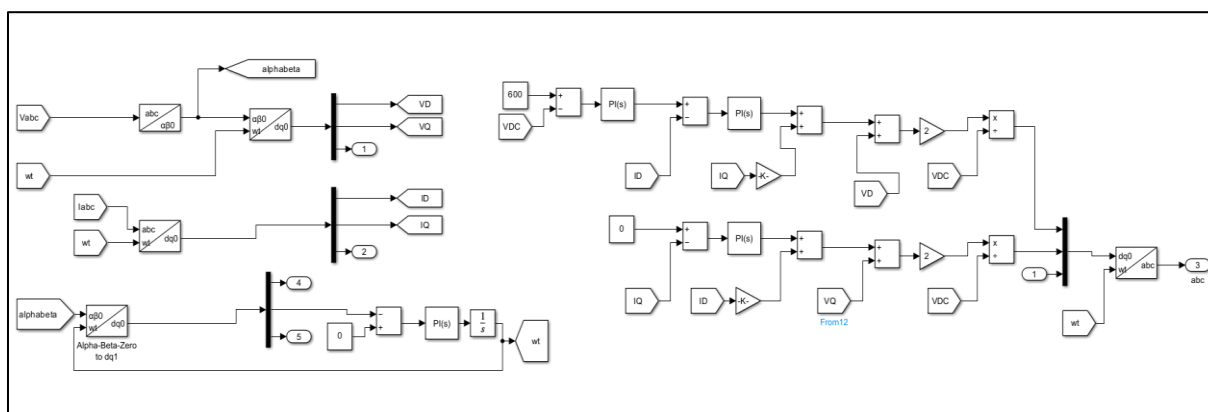


Figure 3.11 modèle 'MATLAB SIMULINK' de la commande d'onduleur

Tableau 3.3 les paramètres de filtre LCL

Inductance (L)	Capacité(C)
500 μ H	100 μ F

3.2.4 Réseau électrique :

Un réseau électrique triphasé est modélisé par un système triphasé sinusoïdal équilibré comme montre la figure suite :

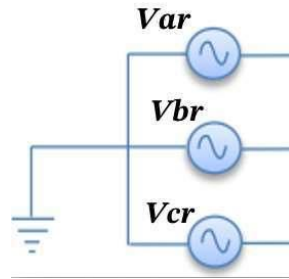


Figure 3.12 Réseau électrique

L'équation de réseau électrique est montée comme suite :

$$\begin{aligned} e_a &= V_m \sin(w_0 t) \\ e_b &= V_m \sin\left(w_0 t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_c &= V_m \sin\left(w_0 t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Ou: $w_0 = 2\pi f_0$

3.3 Etude de notre projet :

Notre travail consiste à étudier et simuler, à l'aide de MATLAB, un système qui utilise des panneaux solaires d'une capacité de 5 KW. L'objectif est d'introduire les énergies renouvelables dans le quotidien des étudiants de réduire les coûts des factures d'électricité pour l'université.

Nous avons choisi le module KC200GT composé de 54 cellules en silicium monocristallin ayant une puissance maximale de 200.143 W, on a utilisé 24 panneaux, (2 en parallèle et 12 en série) pour avoir une puissance maximale de 4803.43 W.

3.4 Fonctionnement dans des conditions environnementales standard STC :

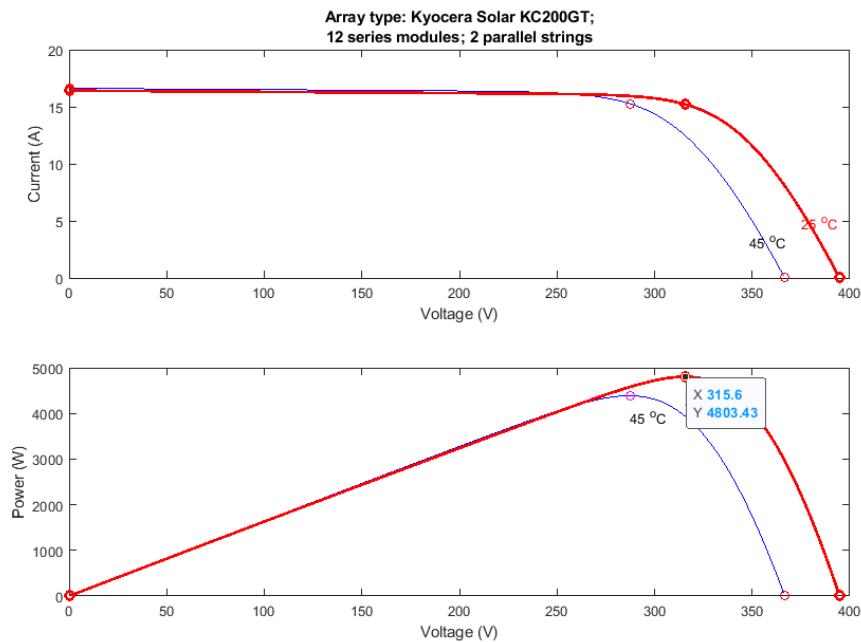


Figure 3.13 Caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ des panneaux PV (Température=25°C/45°C, insolation=1000W/m²)

3.4.1.1.1 Résultats de simulation à la sortie du GPV et convertisseur DC/DC :

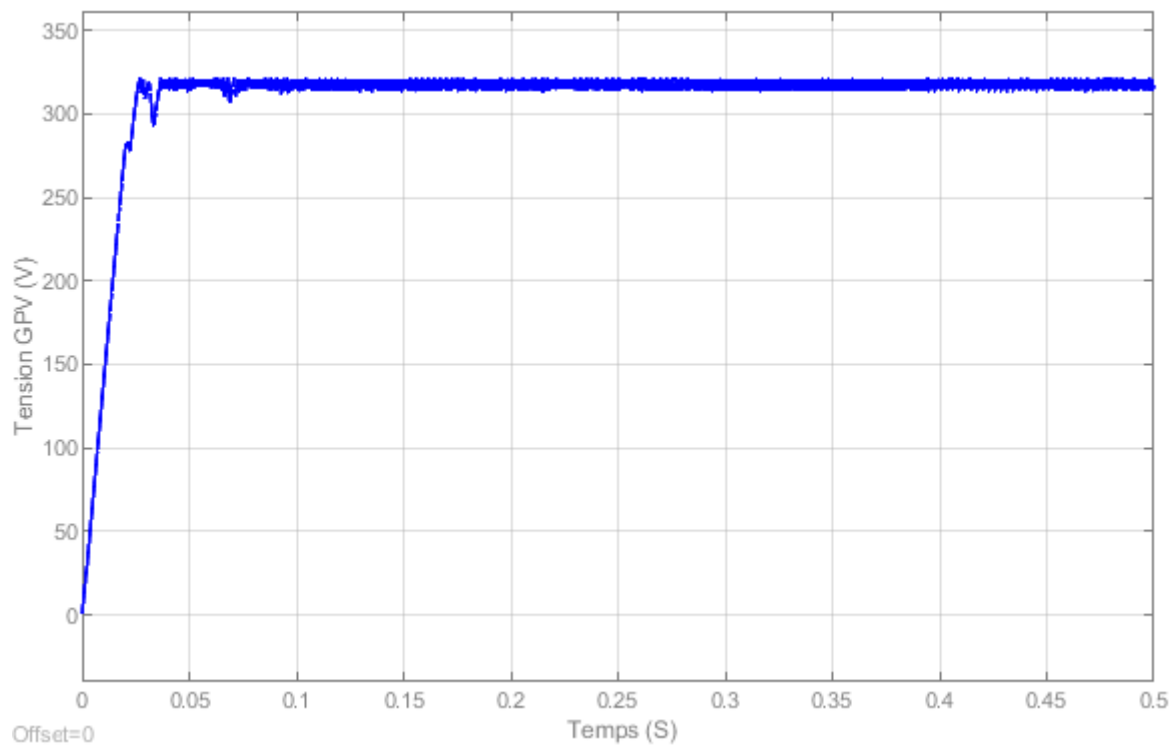


Figure 3.14 Tension de sortie du GPV dans STC

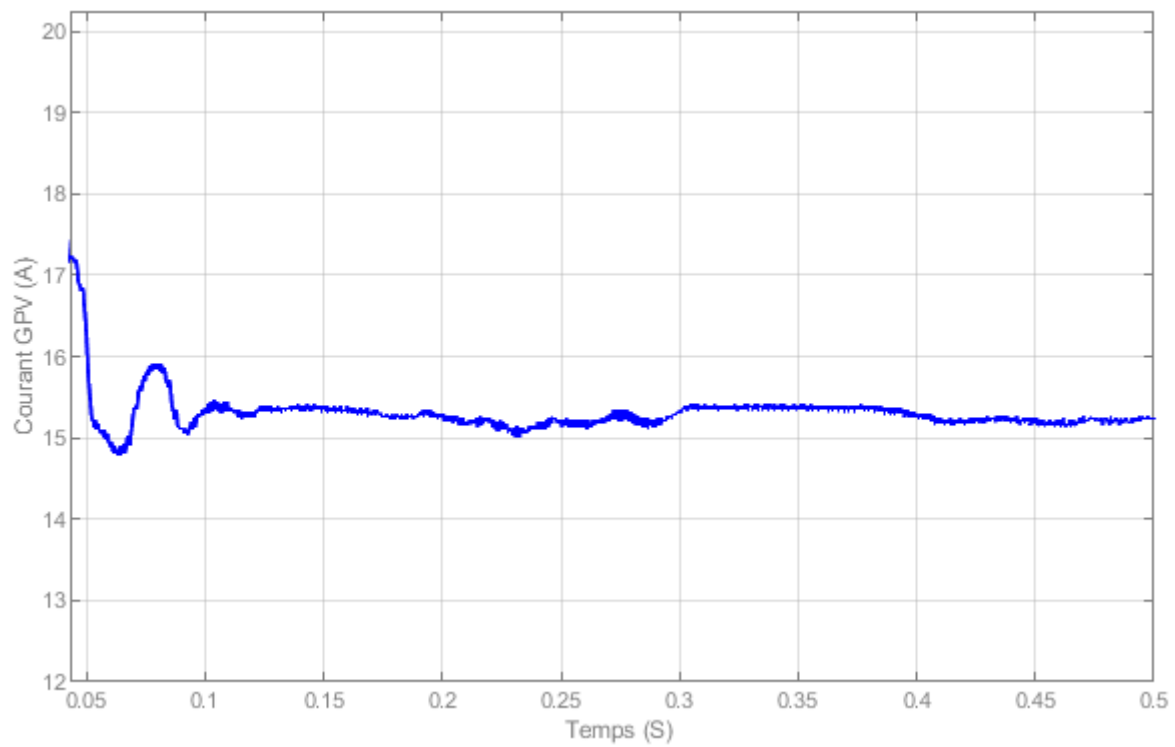


Figure 3.15 courant de sortie du GPV dans STC

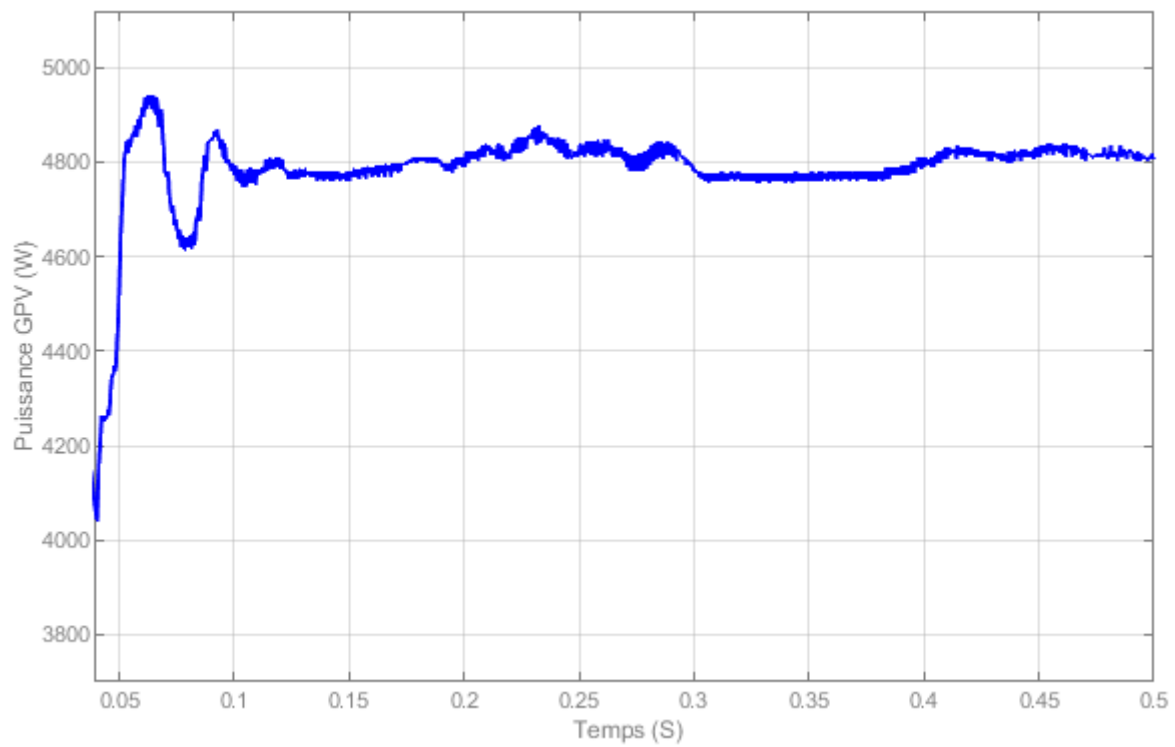


Figure 3.16 puissance de sortie du GPV dans STC

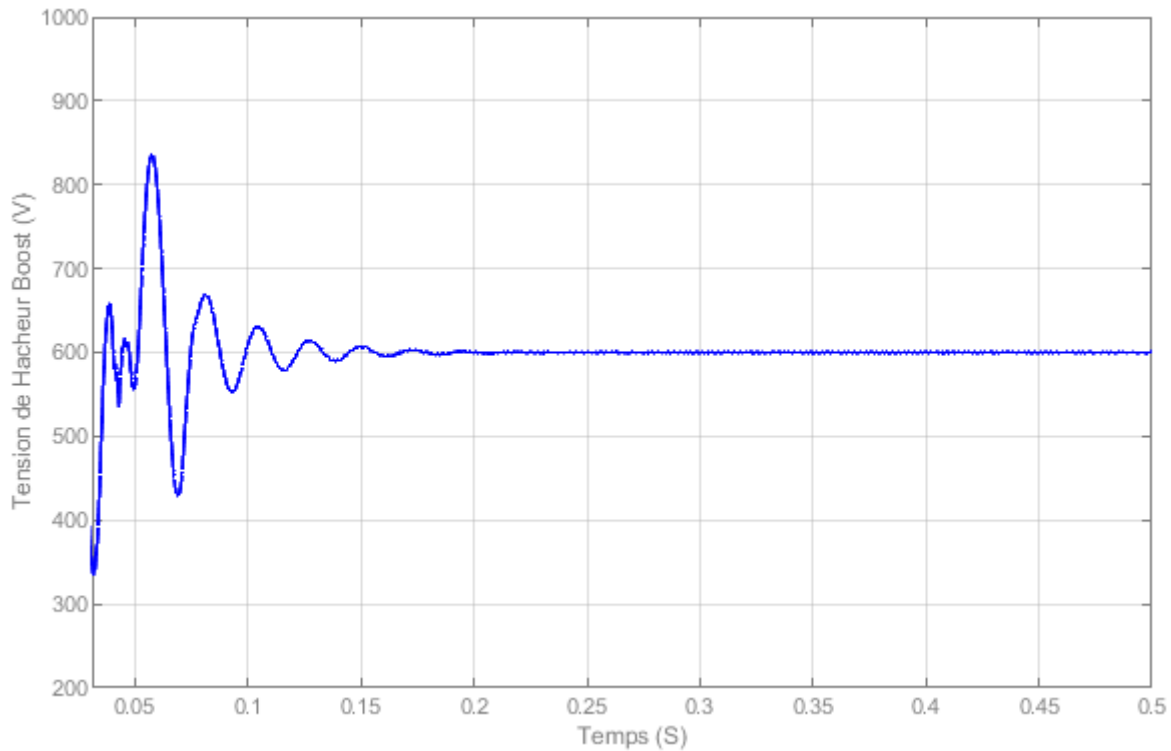


Figure 3.17 Tension de sortie du hacheur boost dans STC

Interprétation des résultats :

Les résultats de simulation indiquent que les grandeurs électriques à la sortie des panneaux solaire et du hacheur élévateur contrôlé par la commande MPPT se stabilisent autour des valeurs cibles. Après une brève période de transition de 0,1 seconde, la commande MPPT maintient le point de fonctionnement près du point du maximum de puissance (PPM) en oscillant légèrement. La puissance fournie par les panneaux solaire se stabilise à environ 4800 W. La tension à la sortie des panneaux se stabilise autour de 315V, tandis que la tension de sortie de l'hacheur se stabilise autour de 600 V. Il est important de noter que la différence de puissance entre la sortie des panneaux et la puissance fournie au réseau reste petite. Ces pertes sont principalement dues à la commutation et à la conduction dans le transistor Mosfet, la diode et les autres composants de la commande MPPT.

3.4.1.1.2 Résultats de simulation à la sortie du convertisseur DC/AC :

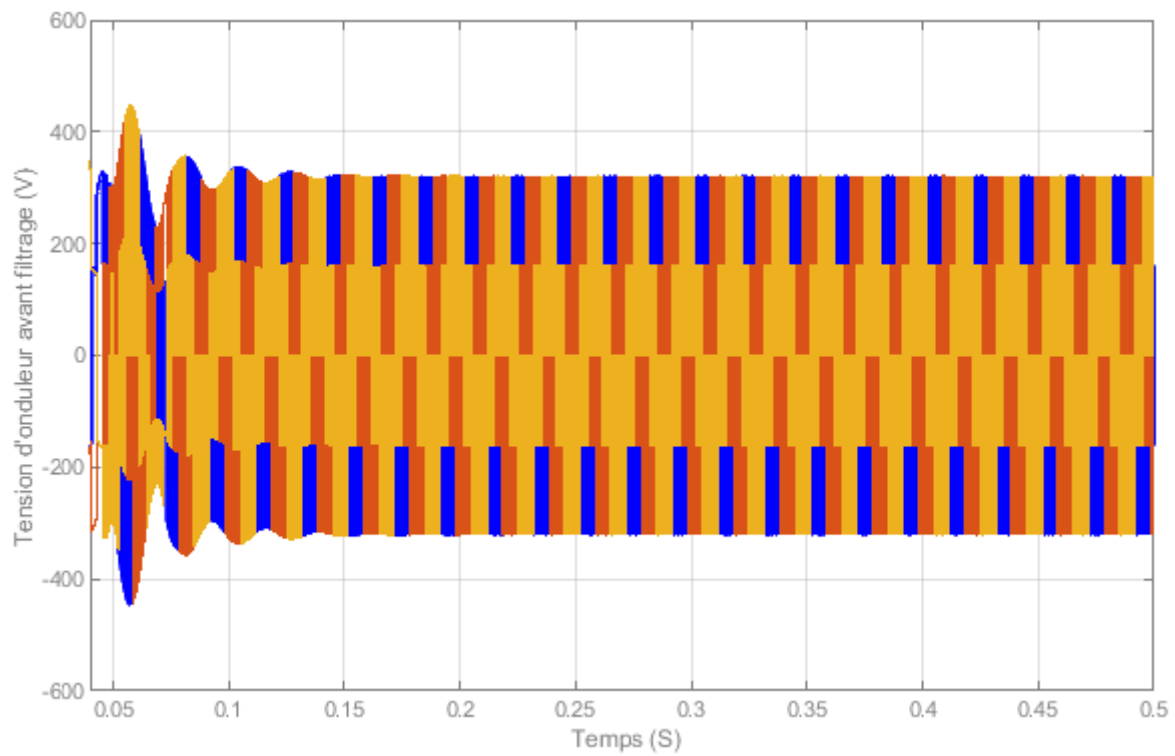


Figure 3.18 Tension de sortie d'onduleur avant filtrage dans STC

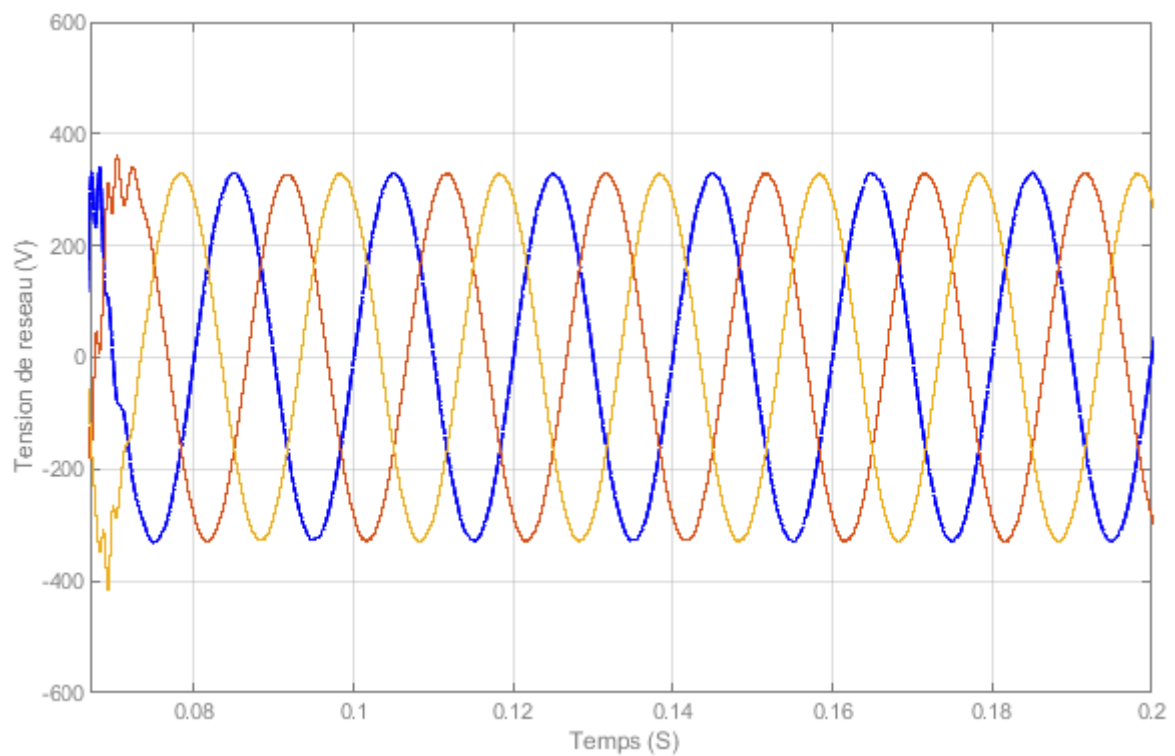


Figure 3.19 Tension de sortie de réseau dans STC

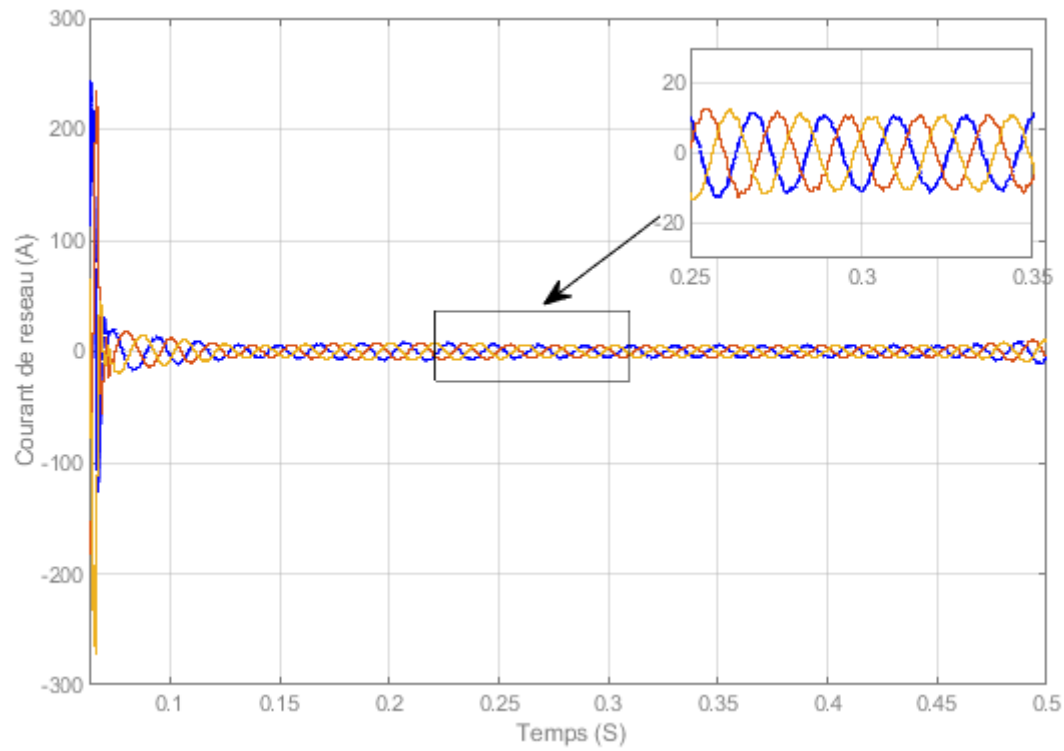


Figure 3.20 Courant de sortie de réseau dans STC

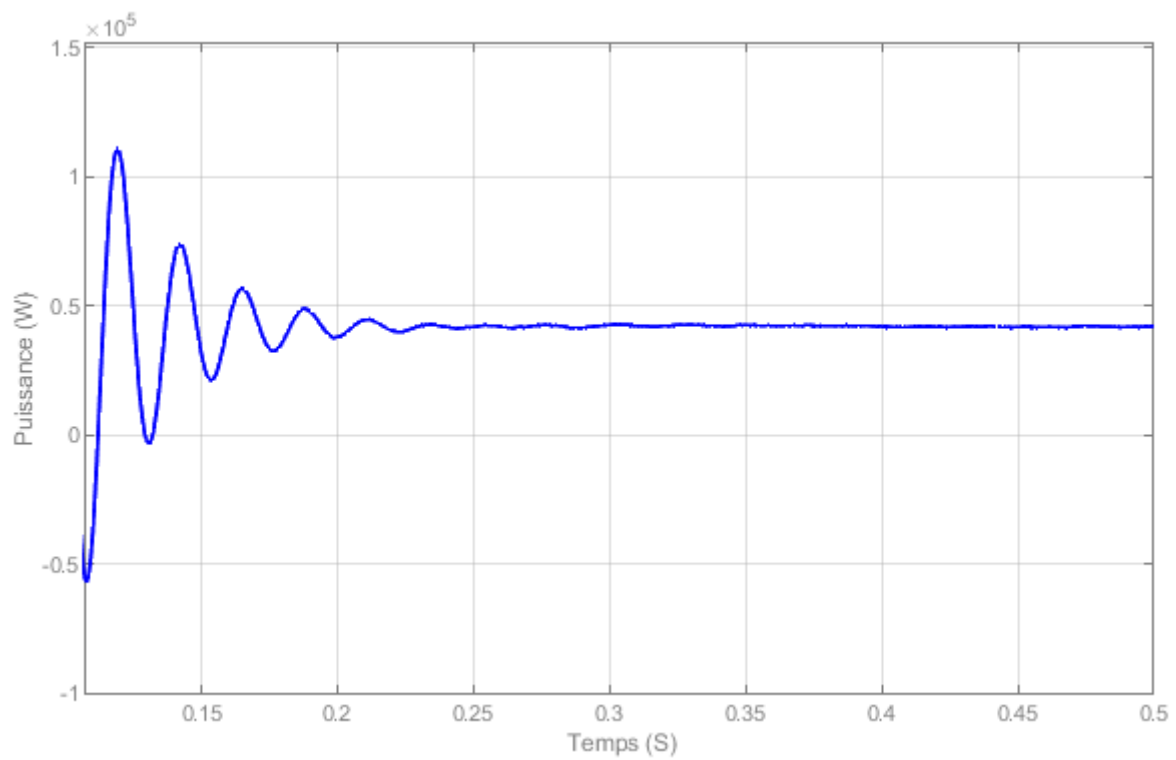


Figure 3.21 Puissance de sortie dans STC

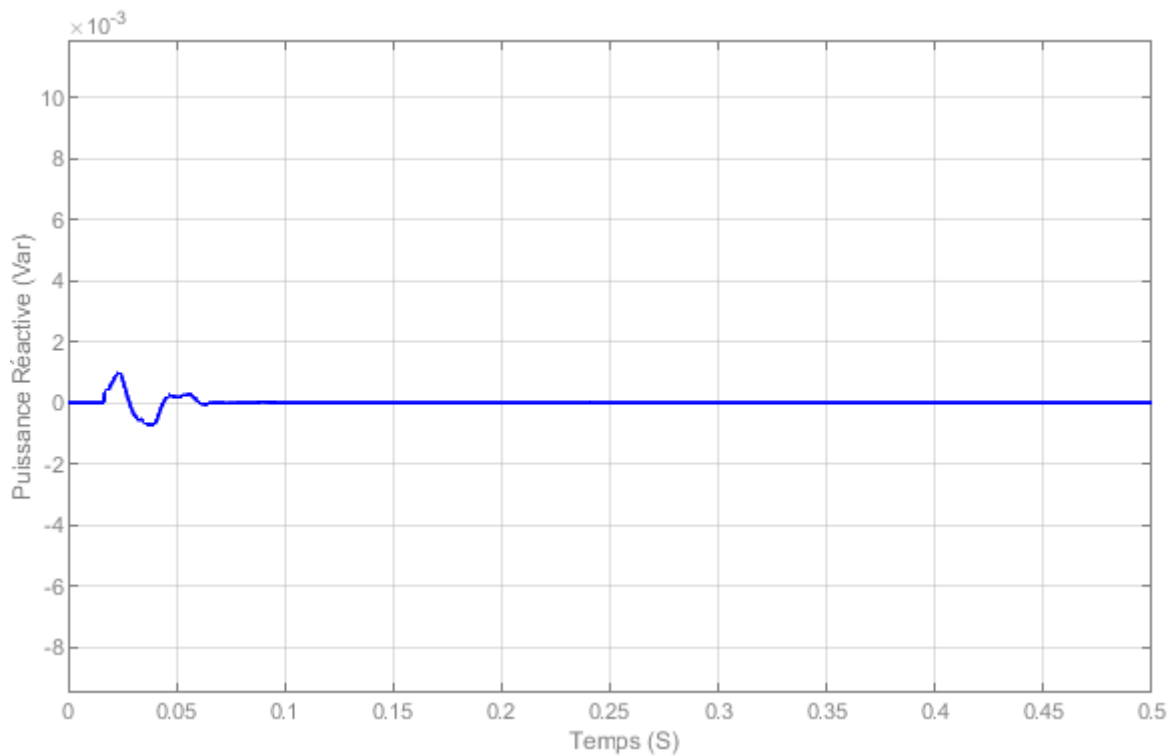


Figure 3.22 la puissance réactive dans STC

Interprétation des résultats :

Nous observons que l'onduleur se caractérise par sa capacité à maintenir une tension et courant de sortie stable et sinusoïdale, à assurer un rendement conversion de l'énergie solaire et à réduire au minimum les pertes d'énergie.

3.5 Fonctionnement dans des conditions environnementales variables :

3.5.1 Eclairement variable et température constante :

Pour présenter l'effet de l'éclairement G sur la puissance, on maintient la température à une valeur constante $T=25^{\circ}\text{C}$ et on fait varier l'éclairement pour Profil lent :

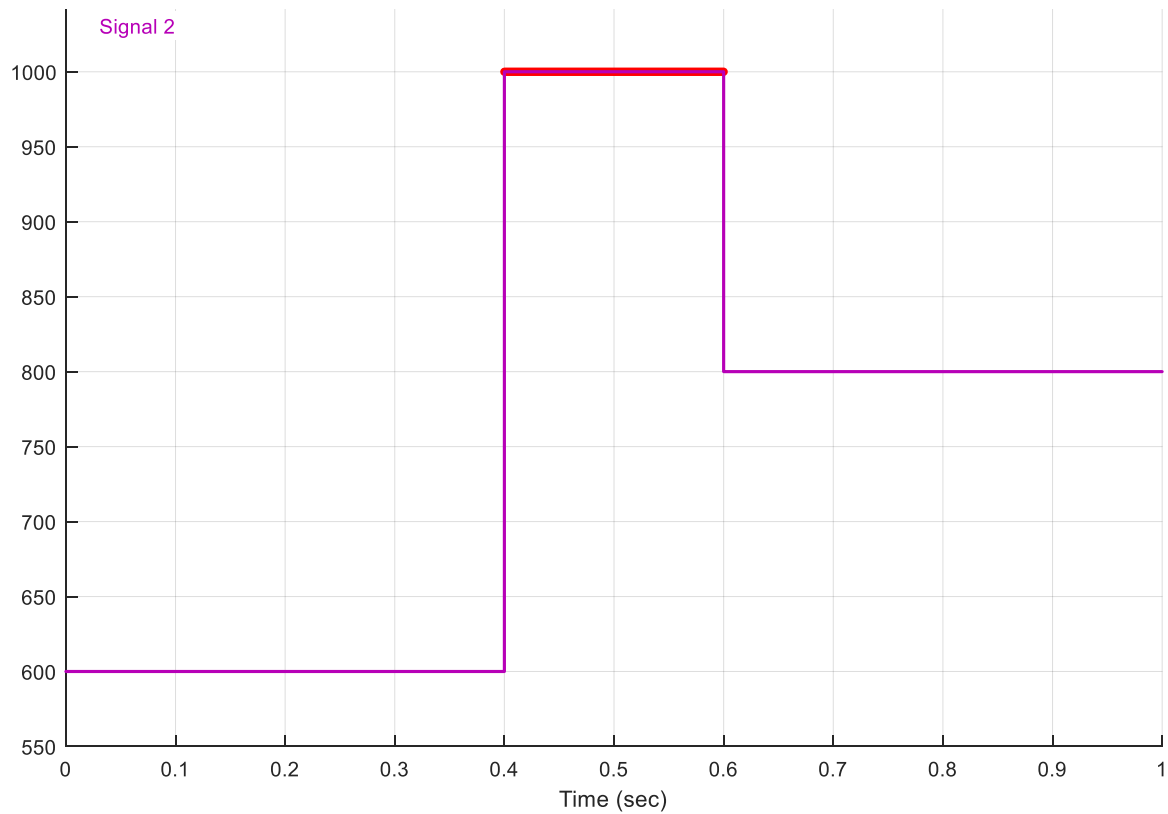


Figure 3.23 Variation de l'éclairement en fonction du temps (profil lent).

3.5.1.1.1 Résultats de simulation à la sortie du GPV et convertisseur DC/DC :

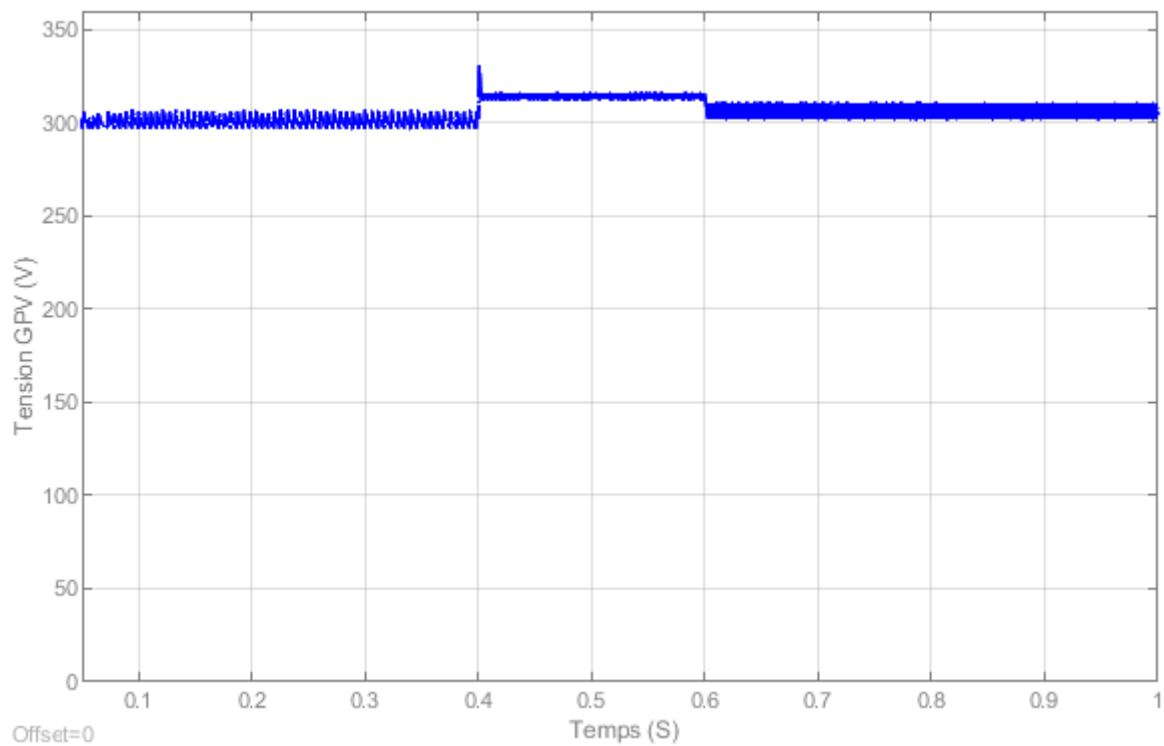


Figure 3.24 Tension de sortie du GPV pour un éclairage variable (profile lent)

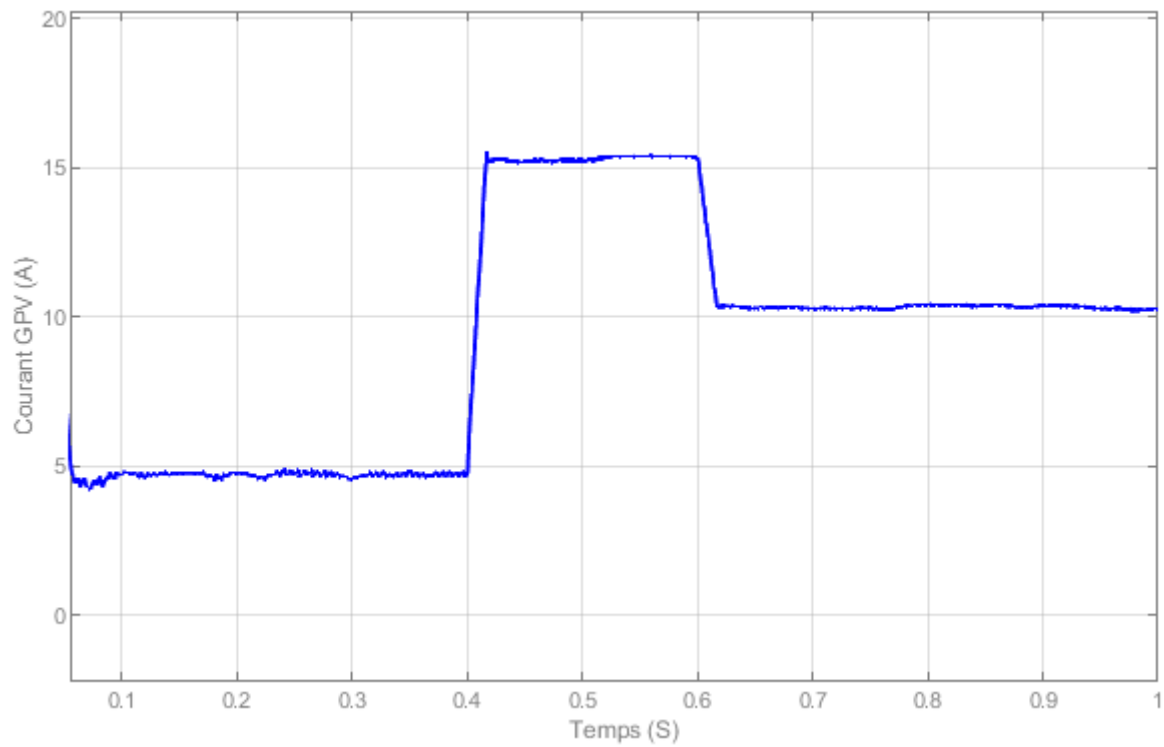


Figure 3.25 Courant de sortie du GPV pour un éclaircissement variable (profile lent).

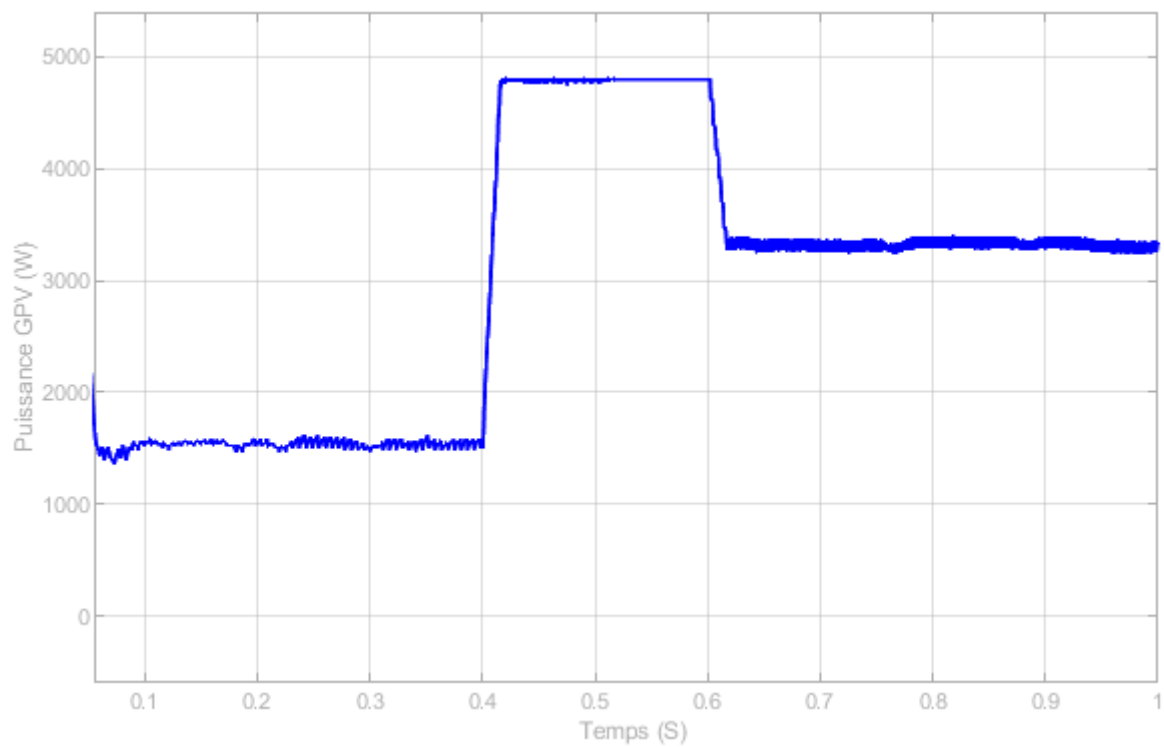


Figure 3.26 puissance de sortie du GPV pour un éclaircissement variable (profile lent)

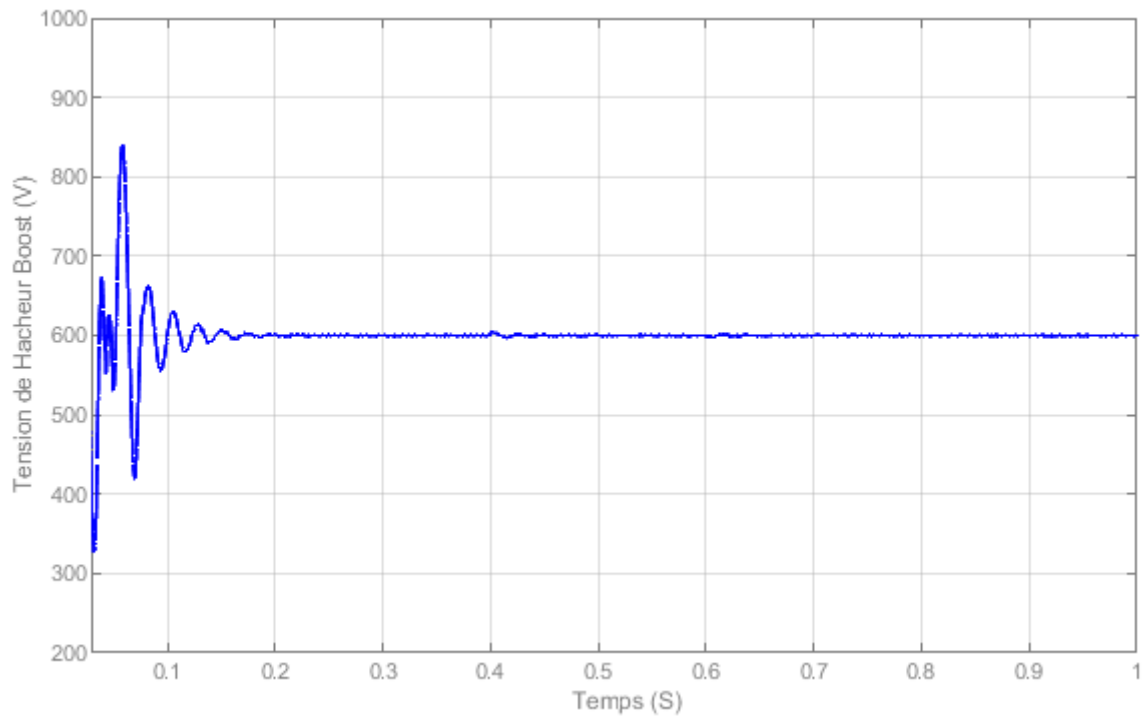


Figure 3.27 Tension de sortie du convertisseur boost pour un éclairage variable (profile lent)

3.5.1.1.2 Résultats de simulation à la sortie du convertisseur DC/AC :

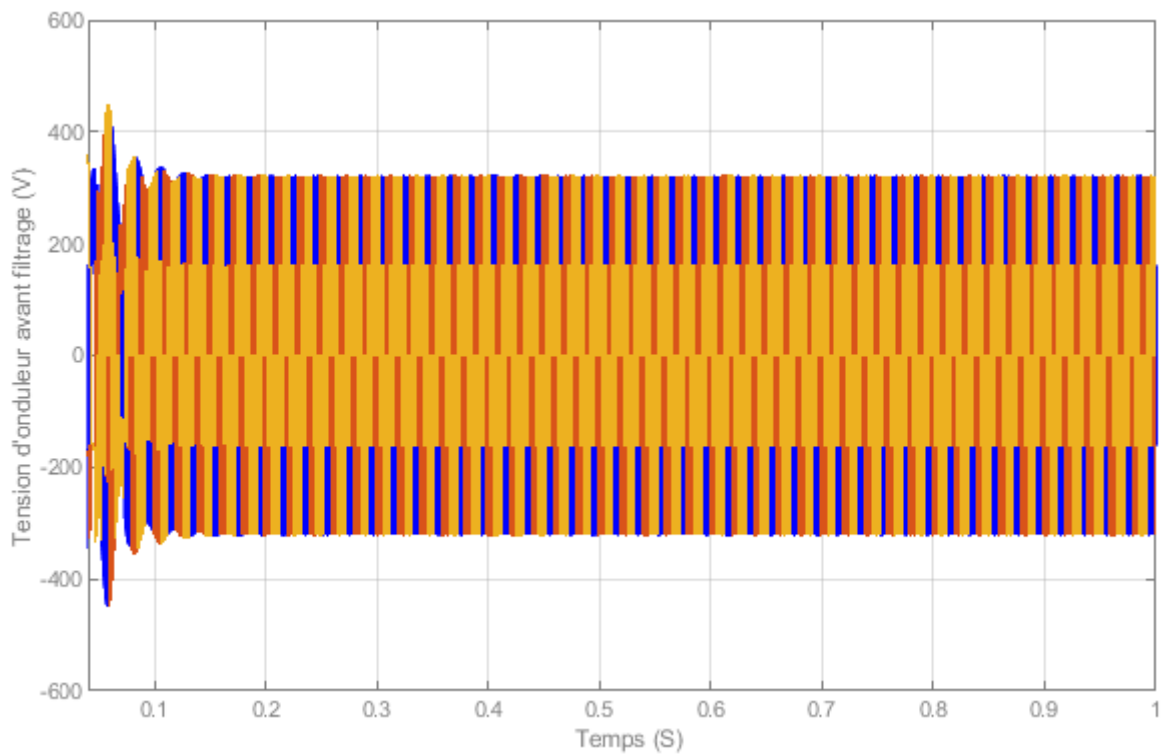


Figure 3.28 Tension de sortie du convertisseur DC/AC pour un éclairage variable (profile lent)

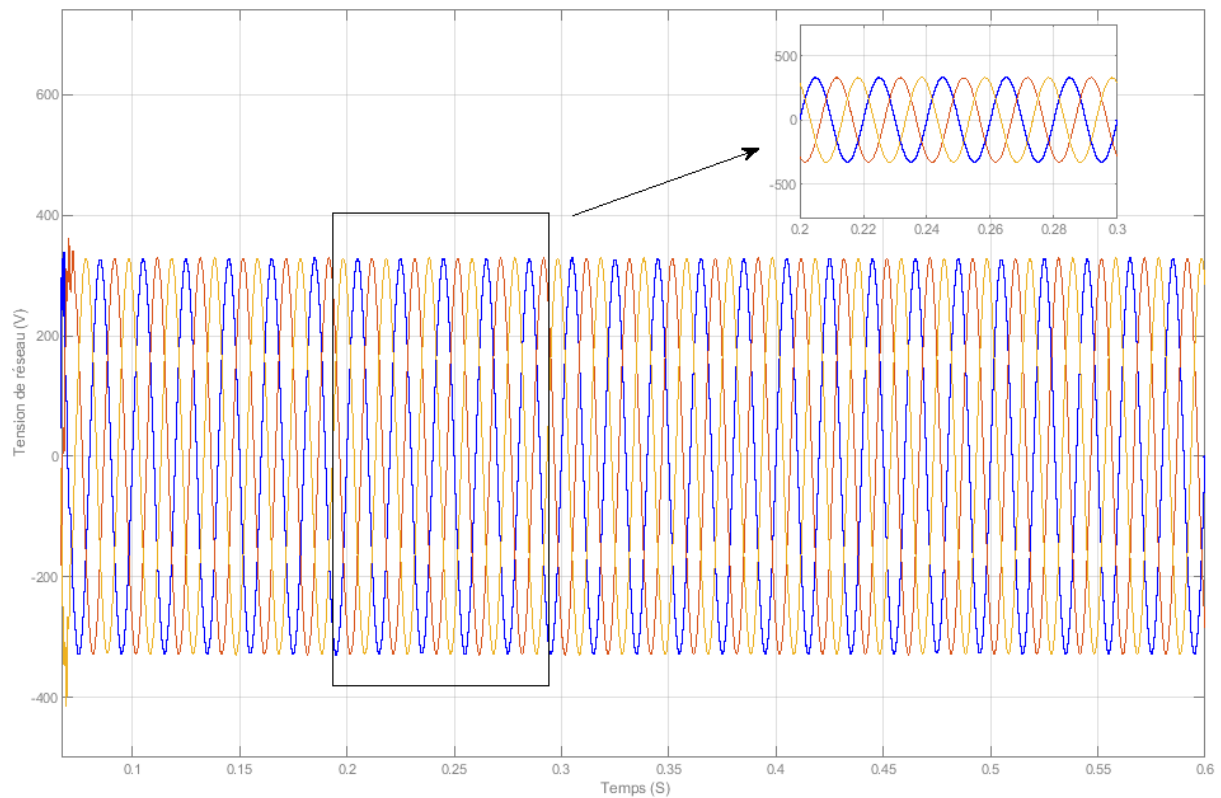


Figure 3.29 Tension de sortie de réseau pour un éclairage variable (profile lent)

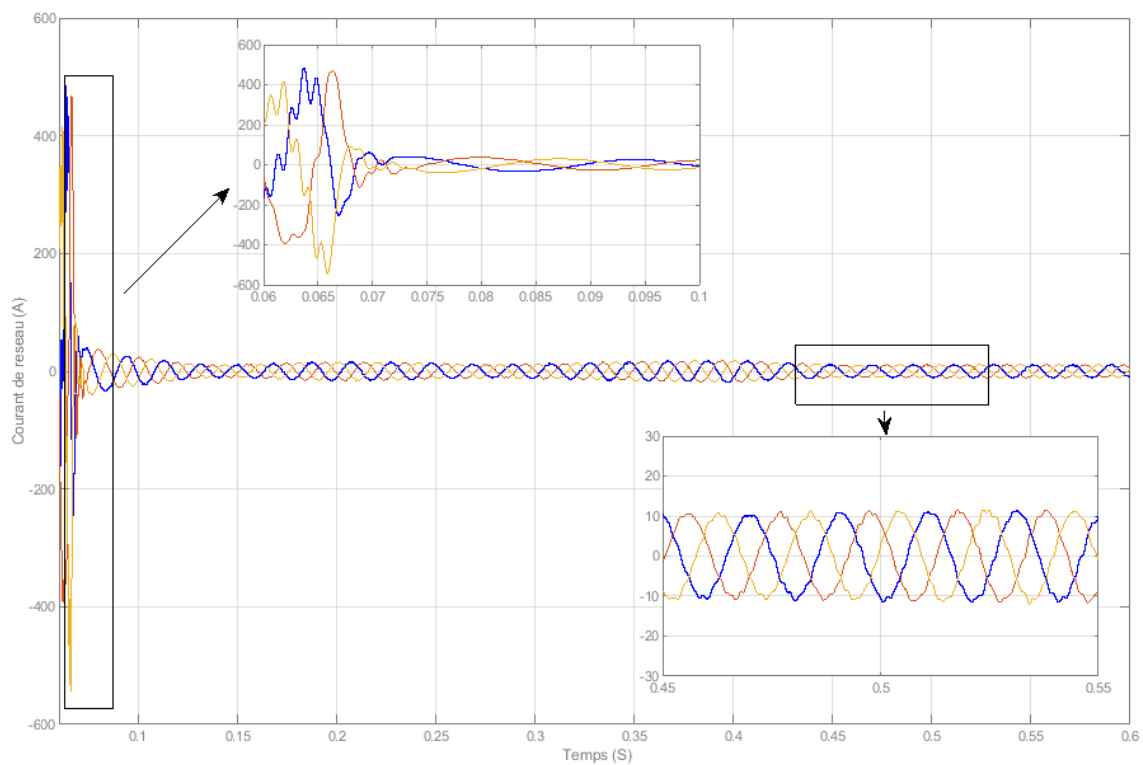


Figure 3.30 Courant de sortie de réseau pour un éclairage variable (profile lent)

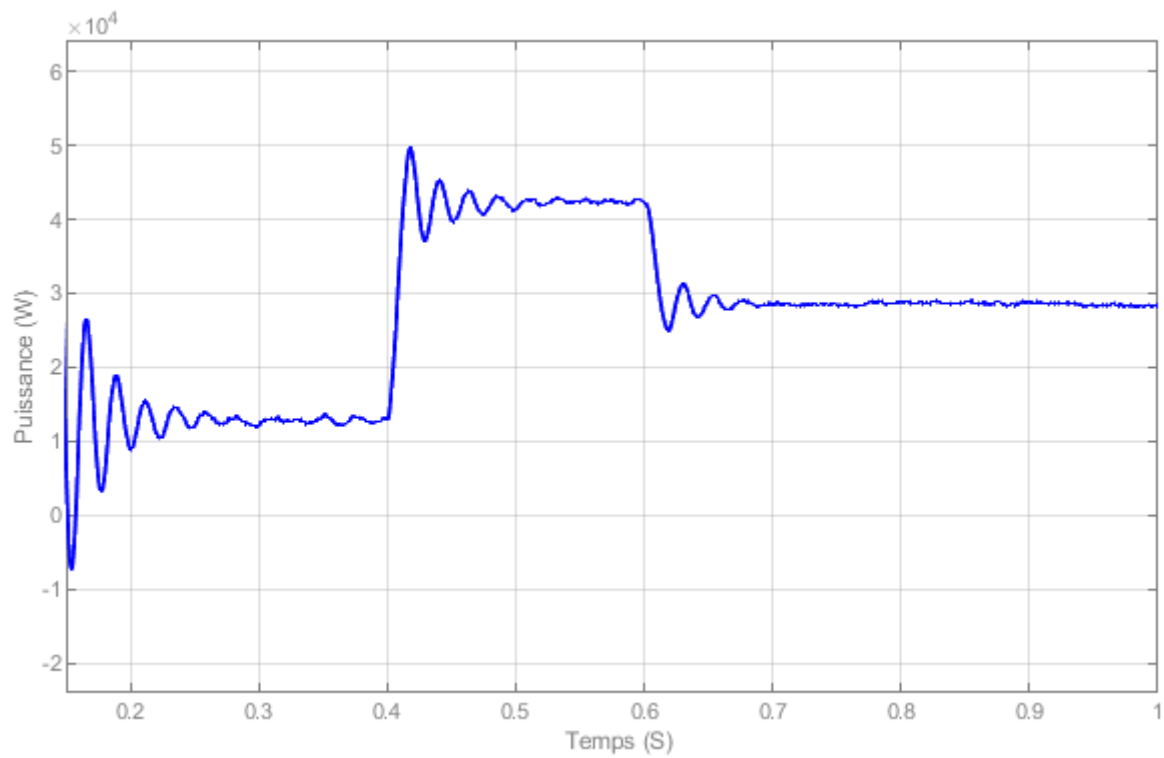


Figure 3.31 Puissance de sortie de la charge pour un éclairage variable (profile lent)

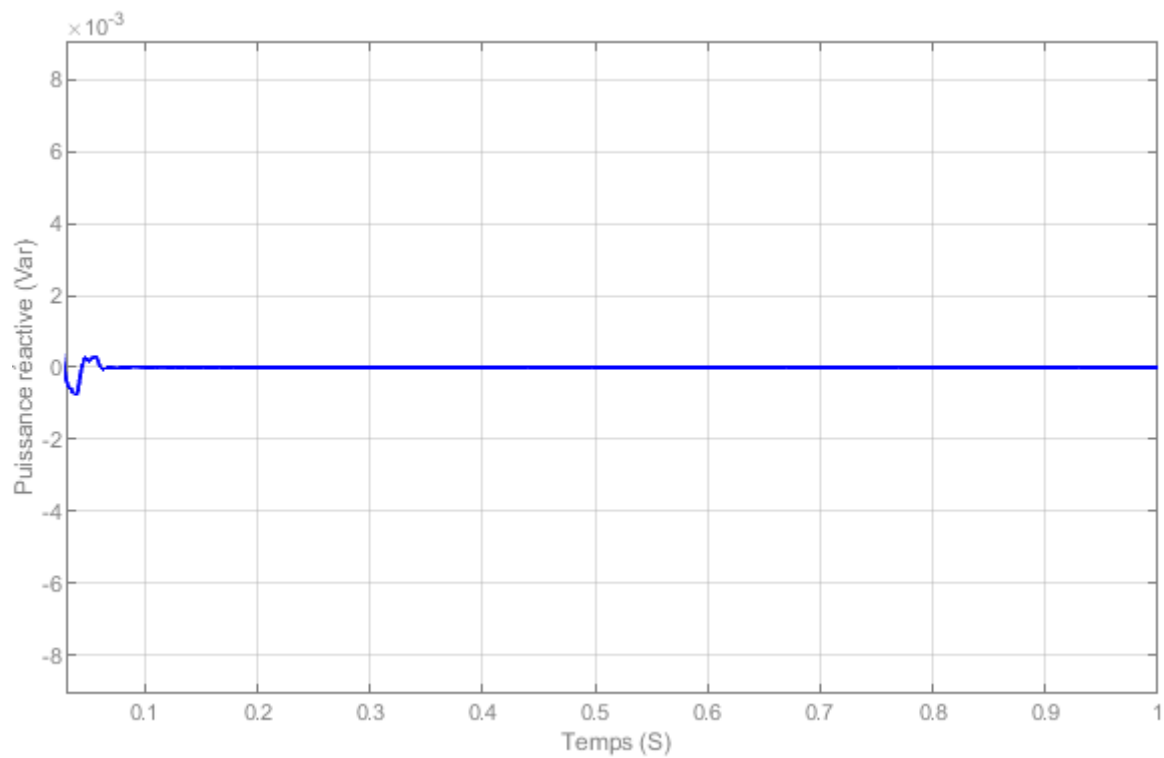


Figure 3.32 Puissance réactive pour un éclairage variable (profile lent)

Interprétation des résultats :

Dans un système PV avec une température constante mais un éclairement solaire variable de 600 W/m^2 , suivi de 1000 W/m^2 , puis d'une diminution à 800 W/m^2 . On peut s'attendre à des variations correspondantes dans la tension et le courant de sortie. Une augmentation de l'éclairement solaire entraînera généralement une augmentation de la tension et du courant de sortie, tandis qu'une diminution de l'éclairement solaire provoquera une diminution de ces grandeurs.

3.5.2 Eclairement constant et température variable :

Pour présenter l'effet de la température T sur la tension, on fait maintenir l'éclairement à une valeur constante $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et on fait varier la température de $(25, 35, 45)^\circ\text{C}$.

3.5.2.1 Profil lent :

Pour un éclairement interne fixé à 1000 W/m^2 , on simule une augmentation de l'éclairement de 25°C à 45°C .

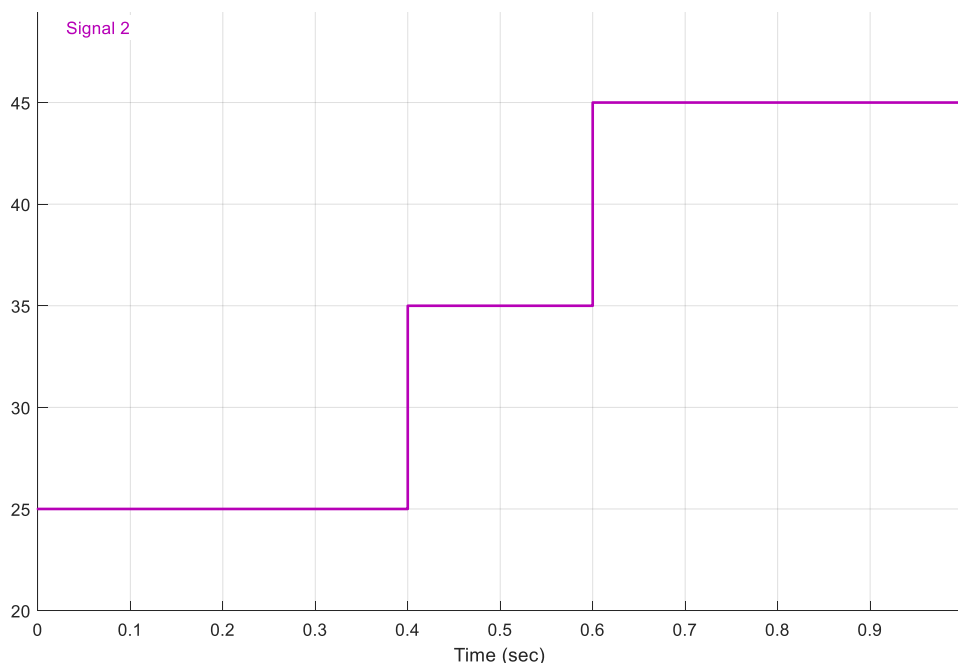


Figure 3.33 Variation de température en fonction du temps (profil lent).

3.5.2.2 Résultats de simulation à la sortie du GPV et convertisseur DC/DC :

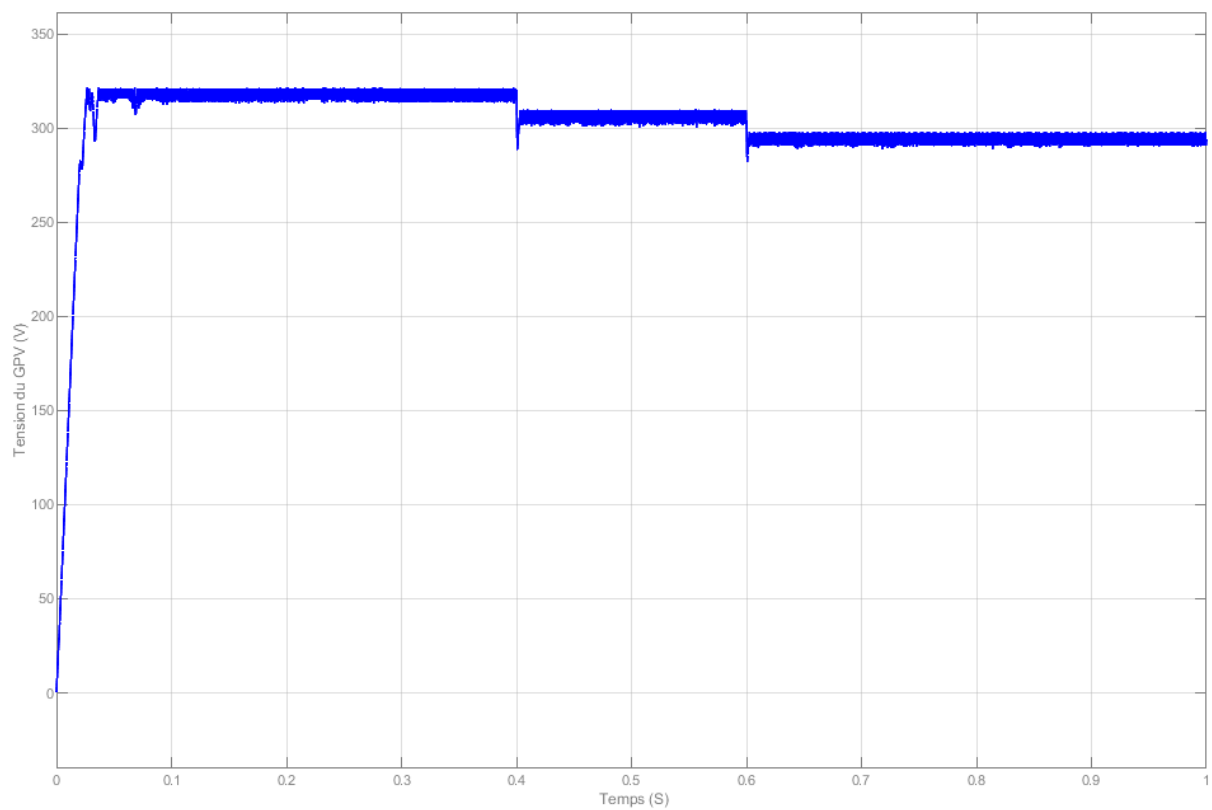


Figure 3.34 Tension de sortie du GPV pour un température variable (profile lent)

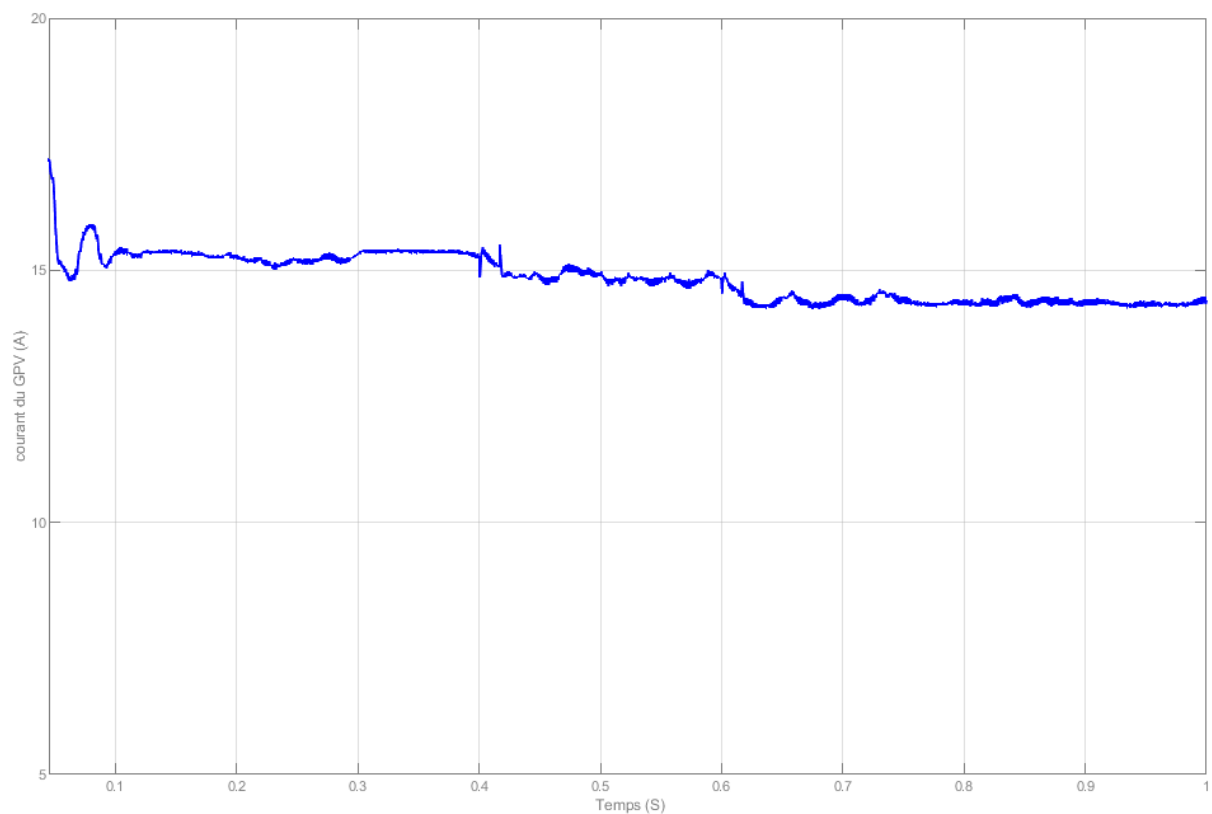


Figure 3.35 Courant de sortie du GPV pour un température variable (profile lent)

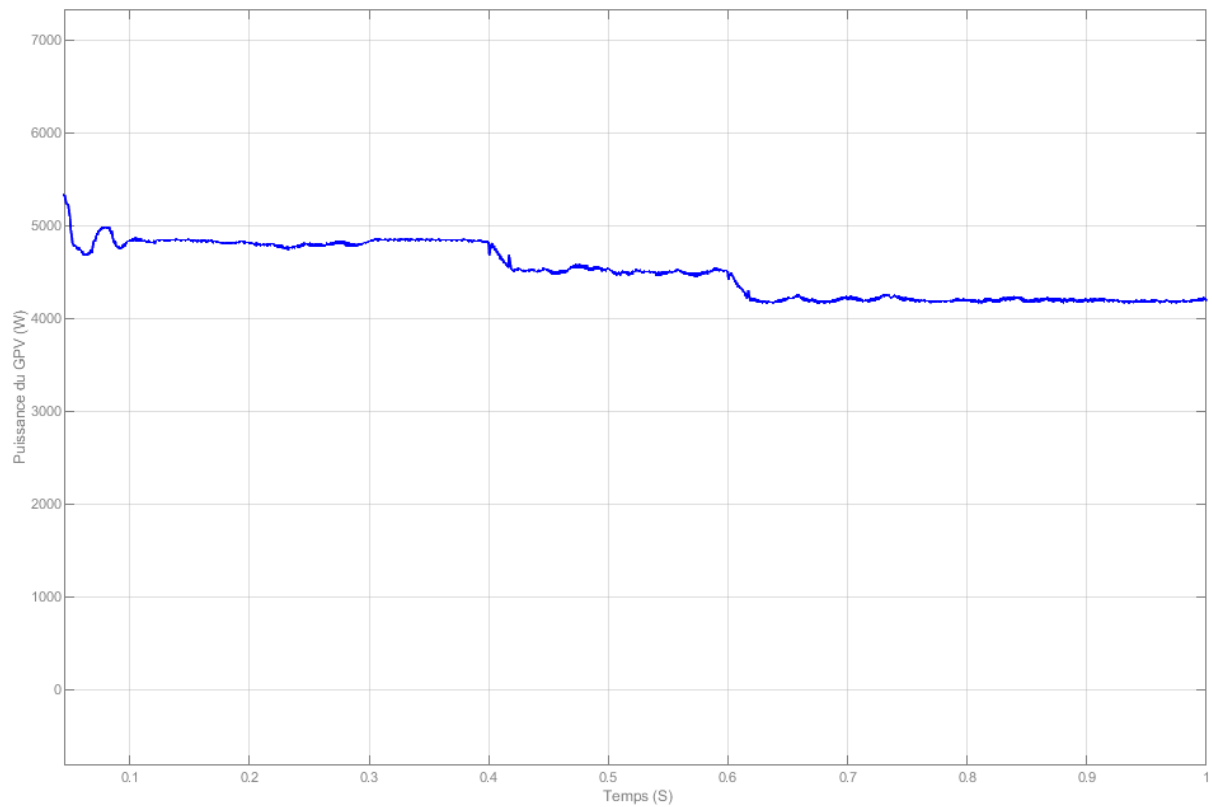


Figure 3.36 Puissance de sortie du GPV pour un température variable (profile lent)

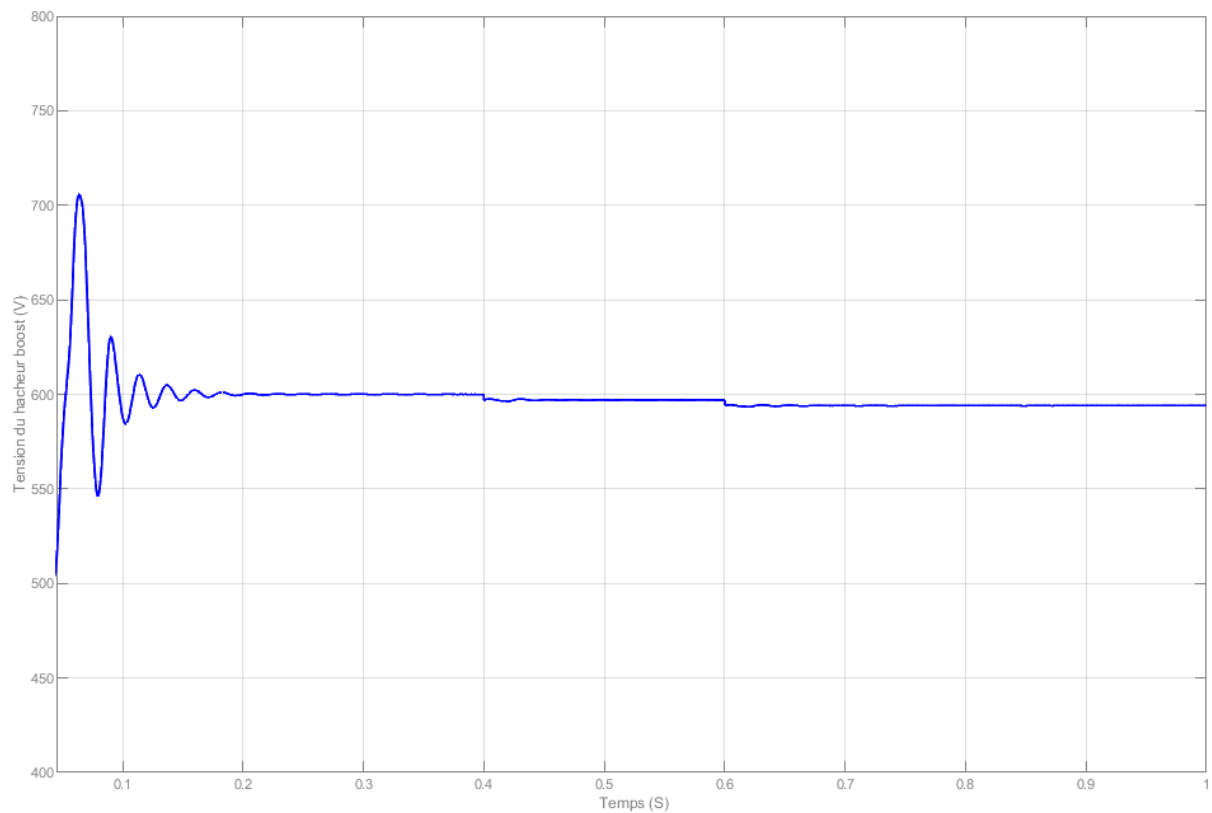


Figure 3.37 Tension de sortie de hacheur boost pour un température variable (profile lent)

3.5.2.2.1 Résultats de simulation à la sortie du convertisseur DC/AC :

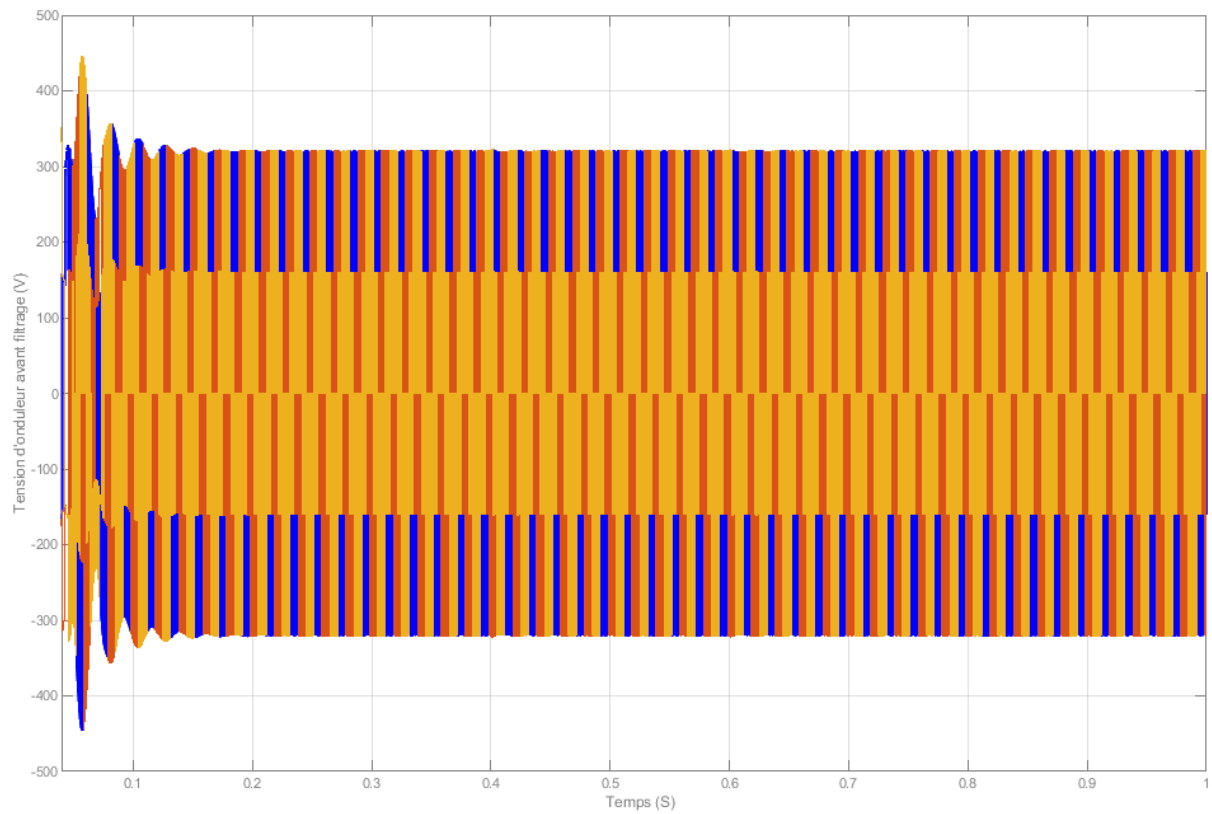


Figure 3.38 Tension de sortie du convertisseur DC/AC pour une température variable (profile lent)

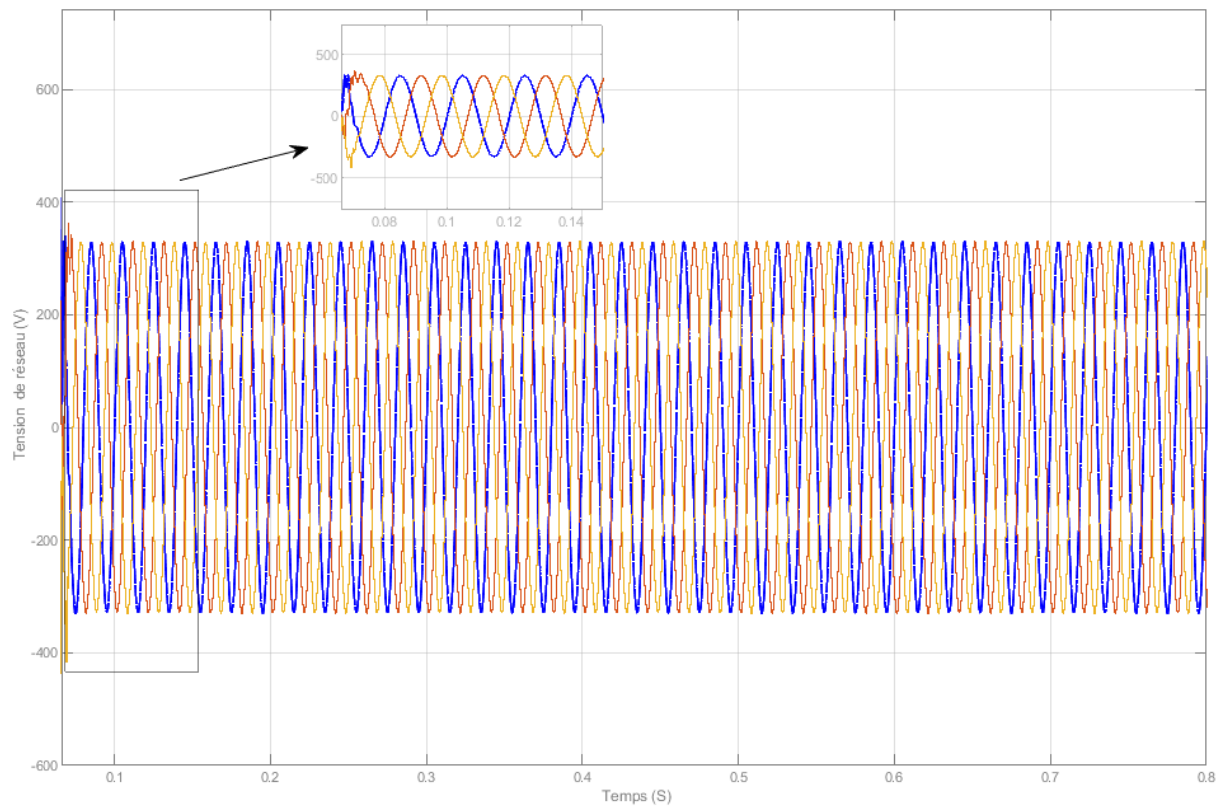


Figure 3.39 Tension de sortie de réseau pour une température variable (profile lent)

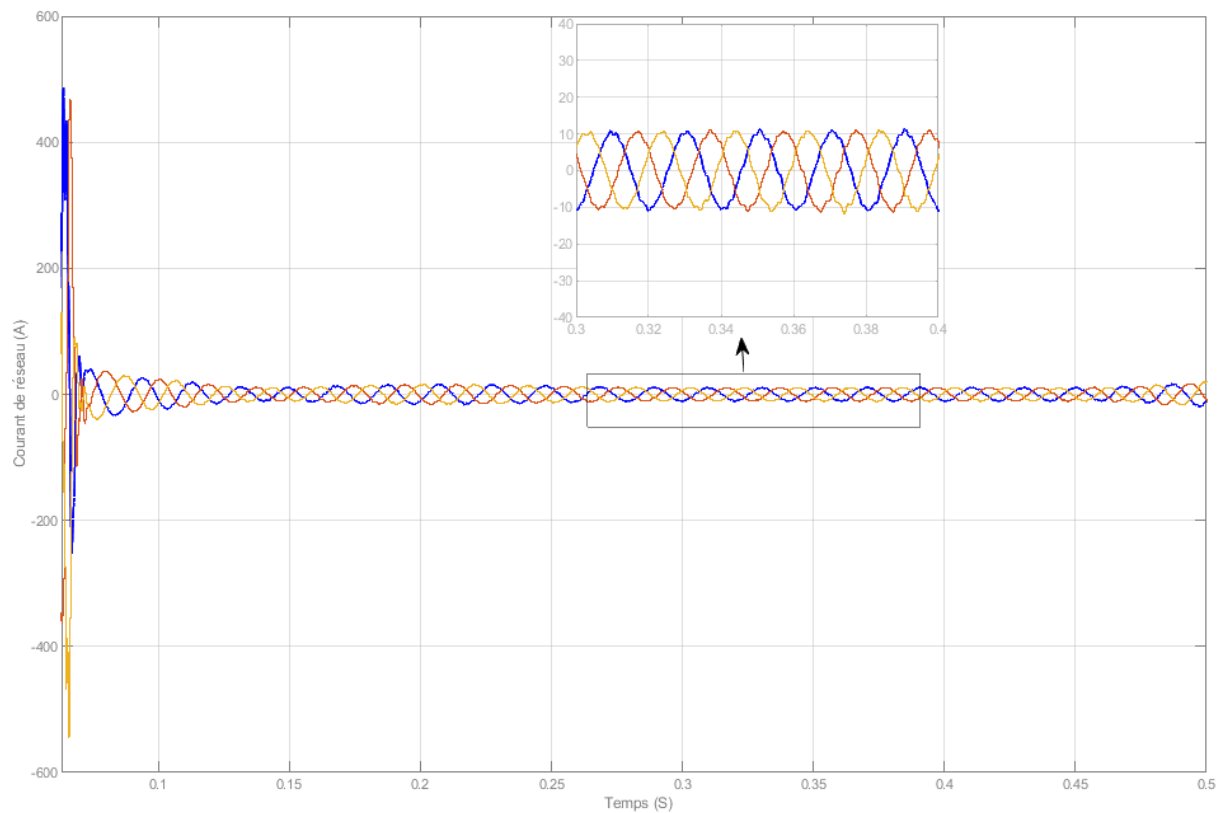


Figure 3.40 Courant de sortie de réseau pour une température variable (profile lent)

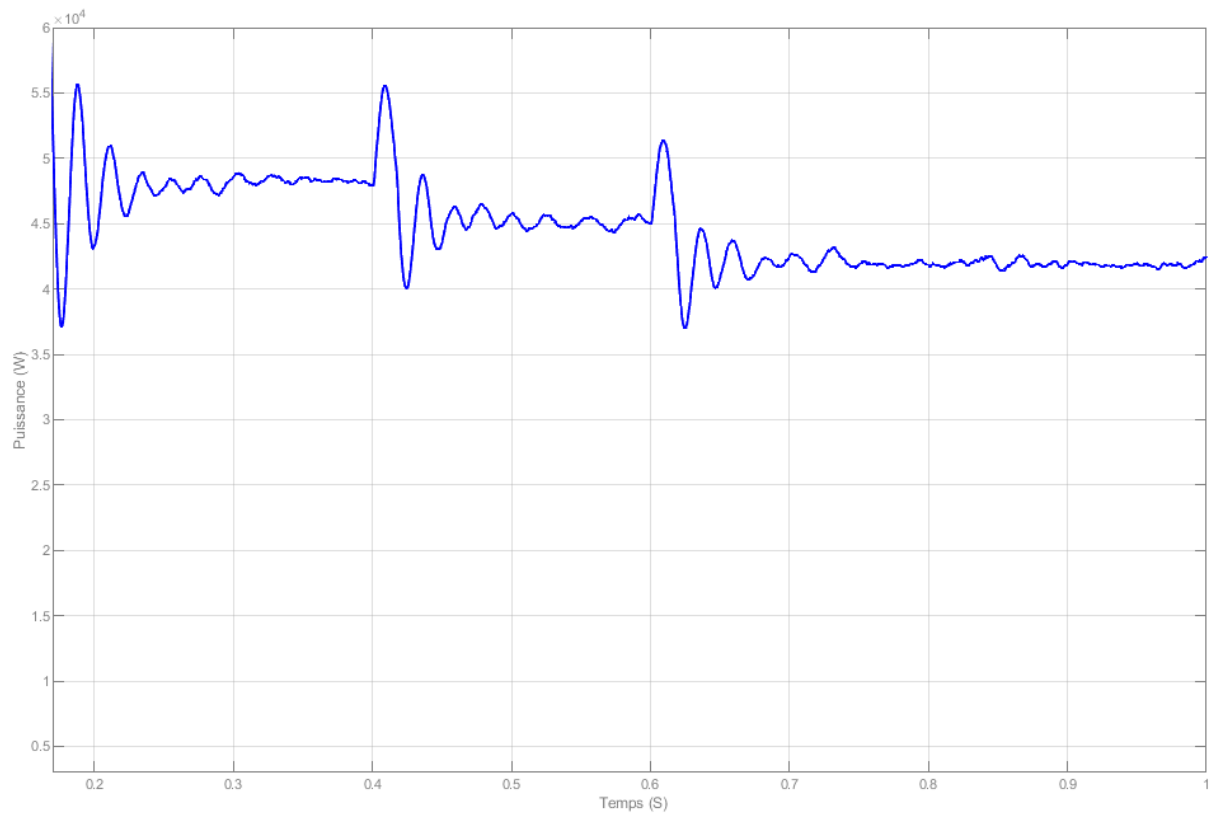


Figure 3.41 Puissance de sortie de la charge pour une température variable (profile lent)

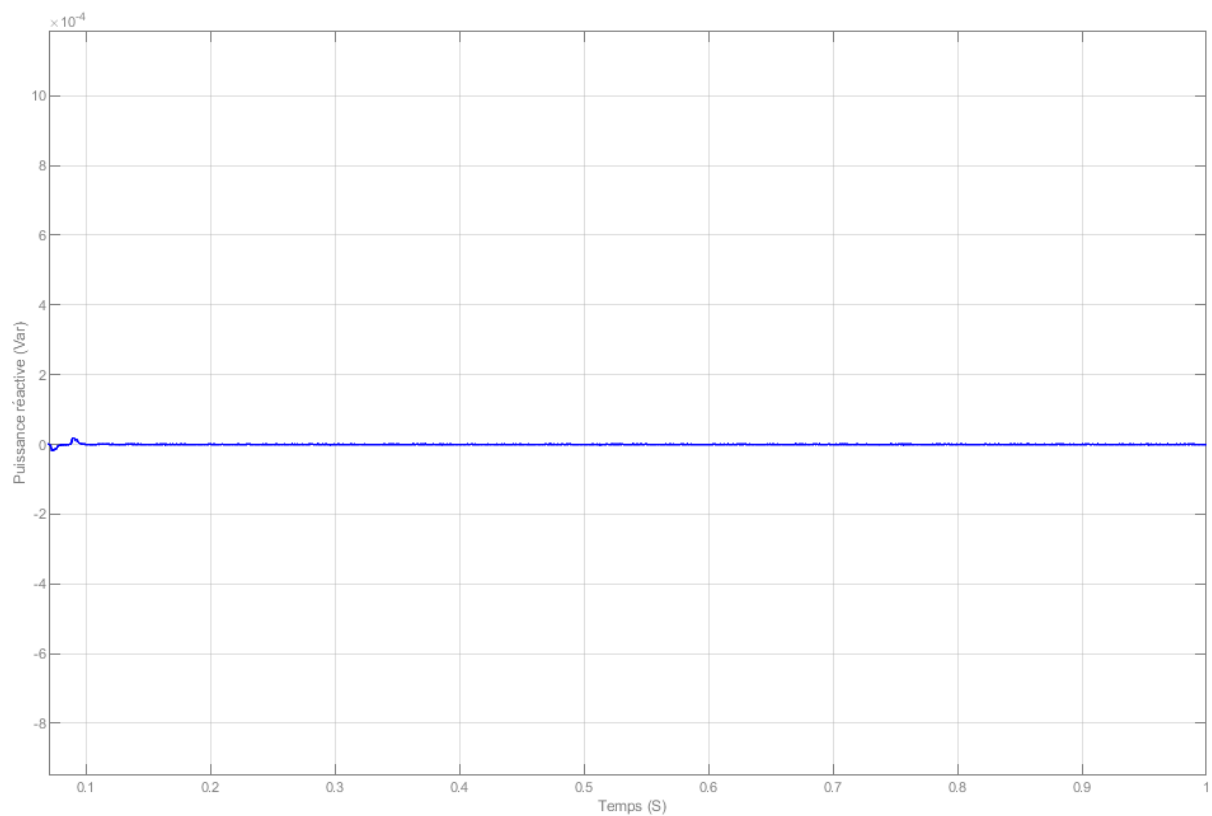


Figure 3.42 Puissance réactive pour une température variable (profile lent)

Interprétation des résultats :

Dans un système PV avec un éclairement solaire constant et une température variant de 25°C à 35°C, puis à 45°C, on peut s'attendre à une diminution de la tension de sortie lorsque la température augmente. Le courant de sortie peut diminuer légèrement ou rester relativement stable avec une augmentation de la température. Ces variations sont principalement dues à l'effet de la température sur les caractéristiques des panneaux solaires.

3.6 Conclusion :

En conclusion, le chapitre 3 offre une vue d'ensemble complète du système photovoltaïque, de sa description et de son fonctionnement dans des conditions environnementales variées. Les résultats de simulation et d'évaluation permettent de comprendre les performances du système dans différentes situations et d'identifier les paramètres clés influençant son efficacité énergétique.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude des systèmes photovoltaïques est essentielle pour comprendre et exploiter efficacement l'énergie solaire. Le chapitre I a fourni une introduction approfondie sur les systèmes photovoltaïques connecté au réseau, en commençant par l'énergie solaire elle-même et en expliquant le gisement solaire et le rayonnement solaire. Ensuite, l'effet photovoltaïque a été présenté, suivi d'une exploration des cellules photovoltaïques, de leurs principes de fonctionnement et des différentes technologies disponibles. L'association des cellules, les caractéristiques des générateurs photovoltaïques et les différentes connexions des systèmes photovoltaïques dans les réseaux ont également été discutées, ainsi que l'effet de l'éclairement, de la température et de l'ombrage sur le comportement des générateurs. Le chapitre a ensuite abordé les différents types de systèmes photovoltaïques, tels que les systèmes autonomes, hybrides et raccordés au réseau, ainsi que les batteries d'accumulateurs utilisées dans ces systèmes.

Le chapitre II s'est concentré sur les convertisseurs statiques et leurs commandes. Les convertisseurs continu-continu (hacheurs) et les convertisseurs DC/AC (onduleurs) ont été expliqués, suivis d'une discussion sur la stratégie de commande DQ et la régulation des courants et des tensions.

Enfin, le chapitre III a abordé la simulation et l'évaluation des résultats. Il a décrit le système photovoltaïque global, en détaillant les composants tels que les panneaux photovoltaïques, le hacheur boost et l'onduleur triphasé. L'étude du projet ont été réalisés, et le fonctionnement du système dans des conditions environnementales standard et variables a été évalué.

Dans l'ensemble, ces chapitres offrent une vue d'ensemble complète des systèmes photovoltaïques, couvrant les principes de base, les technologies, les caractéristiques de fonctionnement, les différents types de systèmes, les convertisseurs statiques et leurs commandes, ainsi que la simulation et l'évaluation des résultats. Cette étude approfondie constitue une base solide pour la compréhension et l'application des systèmes photovoltaïques dans divers contextes

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1]. Helali Kamelia "Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative", mémoire de Magister, UMMTO, TIZI OUZOU, juin 2012.
- [2]. BOUKHERS DJAMIL, "optimisation d'un système d'énergie photovoltaïques application au pompage", mémoire de Magister, Université Mentouri de CONSTANTINE, 2007.
- [3]. Labouret, Braun, Cumunel, Faraggi, A (2010). Cellules solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque. ETSF.
- [4]. Kamel Mokhtari , Youcef Larabi, " étude et simulation d'un système photovoltaïque", Mémoire de MASTER, UMMTO, TIZI-OUZOU, 02 juillet 2018.
- [5]. Anne Labouret, Michel Villos, " Installations photovoltaïques ", 5 édition, Le moniteur, Paris, 2012.
- [6]. MEZIANI Zahra, "MODELISATION DE MODULES PHOTOVOLTAÏQUES" mémoire de magister, UNIVERSITE De BATNA, juin 2012.
- [7]. DJERIOU SALIM, "Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone" mémoire de magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF, 03/07/ 2011.
- [8]. MOHAMED BOUGHOUFALA, "Conception et réalisation d'un système de Suiveur Solaire pour des systèmes photovoltaïques " , mémoire de magister, U.S.T.O UNIVERSITÉ ORAN MOHAMED BOUDIAF, février 2011.
- [9]. Hamida CHOHR AOUI et Ratiba HADBI, "modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau", mémoire de Master, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMCEN, juin 2016.
- [10]. BENHADDOUCHE Nesrine Fatima, "la commande d'un système photovoltaïques d'un satellites" Mémoire de master université Abou beker Belkaid Tlemcen, 2014.
- [11]. S. NAOUAL, "Modélisation et Extraction Automatique des Paramètres d'un Générateur ", Université Ferhat Abbas de Sétif Mémoire de Magister, Département d'électrotechnique , 2010.

- [12]. M.biran."Support de Cours (Destiné aux étudiants de Master Energies renouvelables)", université Amar Thelidji, Laghouat.
- [13]. M.Slama fateh,"Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique " , UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF-UFAS (ALGERIE).
- [14]. <https://gootrio.com/modelisation-dune-cellule-photovoltaïque-sous-matlab-simulink/>
- [15]. ZIAT Soheir Ibtissem et MEDJAHED nour el houda ."Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque commandé par la commande MPPT (P&O)",Mémoire de master, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent.
- [16]. OUABDELKADER Katia et MERSEL Houria," Modélisation et Contrôle d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau", Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia.
- [17]. Khaled Sobaihi,"étude et réalisation d'un hacheur de trancking du point de puissance maximale (MPPT) à contre réaction de tension "mémoire de magister, école nationale polytechnique.
- [18]. B.Grabowski,C.Ripoll et coll. "aide-mémoire électronique"5e édition, L'USINE NOUVELLE DUNOD 2008, Paris.
- [19]. MOHAMED GHEBBACHE."stratégie de commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique dans le but d'optimiser la qualité de l'énergie. «, L'université du Québec à Trois-Rivières, juillet 2019.
- [20]. Karkarine Abdelkader, "modélisation et côntrôl d'un système photovoltaïque "mémoire de master, Université de Badji Mokhtar Annaba, juin 2017.
- [21]. https://www.leonics.com/support/article2_14j/articles2_14j_en.php
- [22]. S. Issaadi, " Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones «, Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.
- [23]. M.Bahmani, A.Semaoui et. « Étude et réalisation d'un convertisseur DC/AC commandé par MLI pour application photoltaïque.» université Ghardaïa, 2022.

- [24]. MECHALIKH M.Nadjib,HAMADA Charaf Eddine « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau » mémoire de Magister, Université KASDI MERBAH – OUARGLA 2013
- [25]. R. younes,"modélisation du rendement du convertisseur DC/AC dans un système photovoltaïque"mémoire de magistère, école nationale polytechnique ENP, Alger,2012
- [26]. N.AIT SIDHOUM," Etude d'un onduleur monophasé : Application aux systèmes photovoltaïques",Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE,Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou,2019.
- [27]. A. Gamni, « Etude et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique (étude de cas réseau d'Adrar) », Mémoire de Master, Université d'Adrar, 2012
- [28]. L. Boulenouar, A. Kahlessenane, « Commande non linéaire d'un système photovoltaïque connecté au réseau », Mémoire de Master, Université de Jijel, 2019
- [29]. F. Boutlilis, « Modélisation et simulation des sources de production décentralisée Application à l'intégration d'un générateur PV à stockage *dans un réseau électrique* », Thèse de doctorat, Université de Mostaganem, 2017/2018
- [30]. L.Zaghba, « Etude et Commande Adaptative par les Techniques Intelligentes Des Systèmes Non linéaires Application aux Systèmes Photovoltaïques », Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2017
- [31]. M. N. Amrani, « Conception d'un onduleur solaire avec MPPT intégré », Thèse de doctorat, Université Oum El Bouaghi, 2019