



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur

Université Ammar Thelidji - Laghouat

Département électrotechnique

Projet de fin d'études

Présenté en vue de l'obtention du

Diplôme de Master en Énergies renouvelables en électrotechnique



**Étude et simulation d'un système
photovoltaïque autonome (au fil de soleil)**

Présenté par :

- **Boughar Mohammed Abdessalam**
- **Laalia Abdelkadir**

Devant le jury :

Belkheiri Ahmed	MCA	Encadrant
Bendjedia Bachir	MCA	Président
Abouchaban Nabil	MCB	Examineur

« Année Universitaire : 2022-2023 »

Resumé :

Ce travail présente une étude détaillée d'un système photovoltaïque autonome avec une focalisation sur la simulation et l'évaluation des résultats. Les principaux aspects examinés incluent l'utilisation d'un convertisseur DC/DC Boost pour optimiser l'efficacité énergétique en utilisant l'algorithme de recherche du point de puissance maximale (MPPT) basé sur l'algorithme P&O. Un convertisseur DC/AC est également analysé, avec une attention particulière portée à la régulation de la tension et du courant à l'aide d'une stratégie de commande PI et de la méthode de découplage Dq. Les performances du système sont évaluées dans diverses conditions environnementales, en tenant compte des variations de l'éclairage solaire et de la température. Cette étude contribue à une meilleure compréhension et à l'optimisation des systèmes photovoltaïques autonomes, favorisant ainsi le développement de l'énergie solaire en tant que source d'énergie durable et efficace. Le dimensionnement du système est également réalisé en tenant compte des spécificités et des exigences du projet. Ce mémoire fournit des informations précieuses pour les chercheurs et les ingénieurs travaillant dans le domaine de l'énergie solaire et constitue une contribution importante à l'avancement des systèmes photovoltaïques autonomes.

Les mots-clés : Système photovoltaïque autonome, Simulation, Évaluation des résultats, Convertisseur DC/DC Boost, MPPT P&O, Convertisseur DC/AC, commande PI, Méthode Dq, Dimensionnement, Énergie solaire.

ملخص:

تقدم هذه الدراسة تحليلاً مفصلاً لنظام طاقة شمسية مستقل مع التركيز على المحاكاة وتقييم النتائج. يتضمن الجوانب الرئيسية المدروسة استخدام محول DC/DC Boost لتحسين كفاءة الطاقة باستخدام خوارزمية البحث عن نقطة الطاقة القصوى (MPPT) المعتمدة على خوارزمية P&O. كما يتم تحليل محول DC/AC، مع التركيز الخاص على تنظيم الجهد والتيار باستخدام استراتيجية التحكم PI وطريقة الفصل Dq. يتم تقييم أداء النظام في ظروف بيئية متنوعة، مع مراعاة تقلبات إضاءة الشمس ودرجة الحرارة. تساهم هذه الدراسة في فهم وتحسين أنظمة الطاقة الشمسية المستقلة، مما يعزز تطوير الطاقة الشمسية كمصدر للطاقة المستدامة والفعالة. يتم أيضاً إجراء تصميم النظام مع مراعاة المواصفات

ومتطلبات المشروع. يوفر هذا البحث معلومات قيمة للباحثين والمهندسين العاملين في مجال الطاقة الشمسية ويشكل مساهمة هامة في تقدم أنظمة الطاقة الشمسية المستقلة.

الكلمات الرئيسية: نظام طاقة شمسية مستقل، محاكاة، تقييم النتائج، محول DC/DC Boost، MPPT P&O، محول DC/AC، التحكم PI، طريقة Dq، تصميم، طاقة شمسية.

Abstract:

This study presents a detailed analysis of an autonomous photovoltaic system with a focus on simulation and evaluation of results. The key aspects examined include the use of a DC/DC Boost converter to optimize energy efficiency using the Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm based on P&O algorithm. A DC/AC converter is also analyzed, with particular attention given to voltage and current regulation using a PI control strategy and the Dq decoupling method. The system's performance is evaluated under various environmental conditions, taking into account variations in solar irradiance and temperature. This study contributes to a better understanding and photovoltaic systems, thereby promoting the development of solar energy as a sustainable and efficient energy source. System sizing is also conducted, considering the specificities and requirements of the project. This provides valuable insights for researchers and engineers working in the field of solar energy and constitutes a significant contribution to the advancement of autonomous photovoltaic systems.

Keywords: Autonomous photovoltaic system, Simulation, Results evaluation, DC/DC Boost converter, MPPT P&O, DC/AC converter, PI control, DQ Decoupling, Sizing, Solar energy.

Remerciements

Tout d'abord nous tenons à remercier Dieu tout puissant, de nous avoir donné la force et le courage d'accomplir ce travail, ainsi que nos parents qui nous ont soutenus tout au long de nos études

Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à Mr. Belkheiri Ahmed pour l'encadrement qu'il nous a assuré et ses précieux et judicieux conseils qu'il n'a cessé de nous prodiguer tout au long de ce projet, sa confiance témoignée, sans oublier ses qualités humaines. Il trouvera ici notre gratitude et notre reconnaissance profondes.

Nous remercions les membres du jury, qui nous ont fait l'honneur de participer au jugement de ce travail.

Nous adressons notre sympathie à toutes les personnes que nous avons pu côtoyer amicalement ces deux dernières années et qui ont toujours su maintenir une ambiance d'étude chaleureuse.

Dédicace

C'est avec une immense gratitude que je dédie ce travail à vous , qui avez joué un rôle essentiel dans ma réussite académique et personnelle.

À mes chers parents, vous êtes mes piliers, ma source de force et de motivation. Votre amour inconditionnel, vos sacrifices et votre soutien indéfectible ont été la clé de ma réussite. Cette dédicace vous est adressée avec un profond respect et une gratitude infinie.

À mes sœurs et mes frères, je vous suis reconnaissant(e) pour votre affection, votre soutien et votre présence précieuse à chaque étape de ma vie. Votre soutien inconditionnel a été un moteur essentiel dans la poursuite de mes objectifs.

À la famille Laalia et la famille Houari, je vous adresse mes sincères remerciements pour votre soutien constant, vos encouragements chaleureux et votre amour inconditionnel. Votre présence bienveillante a été un réconfort permanent tout au long de ce parcours.

À mon amisLaggounMohamed Cherif, je tiens à exprimer ma gratitude pour tes conseils éclairés, tes encouragements et ton soutien inébranlable. Ta présence a été un moteur de motivation et une source d'inspiration tout au long de cette aventure.

Que cette dédicace soit le témoignage de ma reconnaissance profonde envers vous tous, pour votre amour, votre soutien et votre contribution à ma réussite.

Avec tout mon amour et ma gratitude sincère,

L.Abdelkadir

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes parents, qui m'ont donné tant sans jamais rien demander en retour, qui m'ont soutenu et aidé tout au long de mon parcours. Sans eux, je ne serais pas là où j'en suis. Que Dieu les garde le plus longtemps possible et me donne la force de les servir.

Je dédie également ce travail à Toute ma famille et mes amis

Je souhaite également exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

B.MOHAMMED ABDESSALAM

Liste des figures

Chapitre I

Figure I-1 Spectre du rayonnement solaire.....	5
Figure I-2 Composantes du rayonnement solaire au sol.	6
Figure I-3 Représentation schématique de l'effet photovoltaïque	7
Figure I-4 Structure basique d'une cellule solaire.	9
Figure I-5 Représentation schématique d'une cellule photovoltaïque.....	10
Figure I-6 différentes technologies des cellules photovoltaïques	11
Figure I-7 Schéma du circuit équivalent simplifié d'une cellule photovoltaïque	12
Figure I-8 Schéma électrique équivalent d'une cellule PV	14
Figure I-9 Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série	18
Figure I-10 Caractéristiques résultant d'un groupement de np cellules en parallèle	19
Figure I-11 Association mixte des modules.	19
Figure I-12 Caractéristiques I-V pour l'association mixte.....	20
Figure I-13 (a) Architecture Classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protections	21
Figure I-14 Courbes I(V) sous diverses intensités de rayonnement d'une cellule [5].	22
Figure I-15 Effet de la température sur la caractéristique I-V.[5]	23
Figure I-16 représentation la différence de sortie du panneau solaire ombragé et non ombragé	24
Figure I-17 Structure d'un système PV autonome.	25
Figure I-18 Structure d'un système hybride.	25
Figure I-19 Structure d'un système photovoltaïque connecté au réseau.	26

Chapitre II

Figure II-1 Différents types de convertisseurs statiques	32
Figure II-2 Symbole d'un convertisseur DC-DC	33
Figure II-3 Schéma d'un hacheur Buck (abaisseur)	33
Figure II-4 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Buck	35
Figure II-5 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Boost	37

Figure II-6 Schéma électrique d'un hacheur buck- boost.....	37
Figure II-7 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Buck-Boost.....	38
Figure II-8 Schéma bloc de simulation du convertisseur Boost.	40
Figure II-9 Tension de sortie du convertisseur Boost.	41
Figure II-10 Courant de sortie du convertisseur Boost.	41
Figure II-11 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec une commande MPPT .	42
Figure II-12 Schéma de principe du convertisseur MPPT	43
Figure II-13 Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation P&O	45
Figure II-14 Schéma de simulation de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O)	46
Figure II-15 symbole de de convertisseurs DC/AC monophasé et triphasé	47
Figure II-16 Onduleurs autonomes	49
Figure II-17 Les onduleurs interconnectés au réseau	50
Figure II-18 Onduleurs solaires pompage	50
Figure II-19 Structure d'onduleur monophasé	51
Figure II-20 Structures d'onduleurs triphasé.....	51
Figure II-21 MLI à porteuse en dents de scie	53
Figure II-22 Schéma de la boucle interne du courant	54
Figure II-23 Schéma de la boucle externe de la tension.....	55
Figure II-24 La génération de signal de référence utilisant la transformation d-q	57

Chapitre III

Figure III-1 Schéma synoptique de installation off-grid (autonomie au fil de soleil).....	60
Figure III-2 Schéma de la simulation du système photovoltaïque	61
Figure III-3 Modèle 'SIMULINK' du panneau photovoltaïque 200w.....	61
Figure III-4 Modèle 'SIMULINK' du champ photovoltaïque 800w.....	62
Figure III-5 Caractéristiques $I = f(V)$ du panneau PV (température=25°C, insolation=1000w/m ²)	63
Figure III-6 : Caractéristiques $P = f(V)$ du panneau PV (Température=25°C, insolation=1000W/m ²).....	64
Figure III-7 Caractéristiques Courant-Tension pour différents éclairagements	65
Figure III-8 Caractéristiques Puissance Tension pour différents éclairagements	66

Figure III-9 Caractéristiques Courant-Tension pour différentes températures.....	67
Figure III-10 Caractéristiques Puissance–Tension pour différentes températures	67
Figure III-11 schéma de simulation de Hacheur boost avec la commande Mppt.....	68
Figure III-12 modèle 'MATLAB SIMULINK' onduleur monophasé	69
Figure III-13 modèle 'MATLAB SIMULINK' de la commande d'onduleur.....	70
Figure III-14 Tension de sortie du GPV dans STC.....	73
Figure III-15 courant de sortie du GPV dans STC.....	73
Figure III-16 puissance de sortie du GPV dans STC	73
Figure III-17 Tension de sortie du hacheur boost dans STC	74
Figure III-18 Tension de sortie d'onduleur avant filtrage dans STC	75
Figure III-19 Tension de sortie de la charge dans STC.....	75
Figure III-20 Courant de sortie de la charge dans STC.....	75
Figure III-21 Puissance de sortie de la charge dans STC	76
Figure III-22 la puissance réactive dans STC	76
Figure III-23 Variation de l'éclairement en fonction du temps (profil lent).	77
Figure III-24 Tension de sortie du GPV pour un éclairement variable (profile lent)	78
Figure III-25 Courant de sortie du GPV pour un éclairement variable (profile lent).	78
Figure III-26 puissance de sortie du GPV pour un éclairement variable (profile lent).....	78
Figure III-27 Tension de sortie du convertisseur boost pour un éclairement variable (profile lent).....	79
Figure III-28 Tension de sortie du convertisseur DC/AC pour un éclairement variable (profile lent).....	79
Figure III-29 Tension de sortie de la charge pour un éclairement variable (profile lent)	80
Figure III-30 Courant de sortie de la charge pour un éclairement variable (profile lent)	80
Figure III-31 Puissance de sortie de la charge pour un éclairement variable (profile lent) ...	80
Figure III-32 Puissance réactive pour un éclairement variable (profile lent)	81
Figure III-33 Variation de température en fonction du temps (profil lent).	82
Figure III-34 Tension de sortie du GPV pour un température variable (profile lent).....	82
Figure III-35 Courant de sortie du GPV pour un température variable (profile lent).....	83
Figure III-36 Puissance de sortie du GPV pour un température variable (profile lent)	83
Figure III-37 Tension de sortie de hacheur boost pour un température variable (profile lent)	83

Figure III-38 Tension de sortie du convertisseur DC/AC pour un température variable (profile lent).....	84
Figure III-39 Tension de sortie de la charge pour un température variable (profile lent).....	84
Figure III-40 Courant de sortie de la charge pour un température variable (profile lent).....	84
Figure III-41 Puissance du sortie de la charge pour un température variable (profile lent)....	85
Figure III-42 Puissance réactive pour un température variable (profile lent)	85
Figure III-43 Tension de la charge inductive.....	86
Figure III-44 Courant de la charge inductive.....	86
Figure III-45 Puissance de la charge inductive.....	87
Figure III-46 Puissance réactive de la charge inductive.....	87

Liste des Tableaux

Tableau II-1Caractéristiques des commandes par MLI [25]	53
Tableau III-1Paramètres du module PV KC200GT aux conditions standards[4]	63
Tableau III-2 les valeurs des composantes de hacheur boost	68
Tableau III-3 les paramètres de filtre LC	70
Tableau III-4 Représentation de consommation journalière des charges	71

Acronymes

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 :ProportionnelIntegral

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 ($^{\circ}$ K).
G : L'éclairement de référence (1000 W/m²).
T_{ref}: La température de référence (298 $^{\circ}$ 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:Chargel'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_{sc_m}: 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.
 α :le rapport cyclique.
V_{dc}:Tension continue.(V)
V_{ac}*: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)

Fe:Fréquence(Hz)

T:temps (s)

Pc:puissance de charge (W)

R:résistance (Ω)

Fs:Fréquence de commutation (rad/s)

Ts:temps de commutation(s)

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I Les généralités sur les systèmes photovoltaïques	1
Introduction :	4
I.1 L'énergie solaire :	4
I.1.1 Gisement solaire	4
I.1.2 Le rayonnement solaire:	4
I.2 Durée d'insolation :	6
I.3 L'effet photovoltaïque :	7
I.4 La cellule photovoltaïque (photopile) :	8
I.4.1 Principe De Fonctionnement	9
I.4.2 Les différentes technologies des cellules photovoltaïques	9
I.4.3 Les différentes technologies des cellules photovoltaïques. Error! Bookmark not defined.	
I.4.4 Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire :	12
I.5 Générateur photovoltaïque	17
I.7 Association des cellules	17
I.7.1 Association en série	17
I.7.2 Association en parallèle	18
I.7.3 Association mixte (série parallèle)	19
I.7.4 les caractéristiques et les problèmes potentiels des générateurs solaires.....	20
I.8 Comportement d'un générateur photovoltaïque	21
I.8.1 Influence de l'éclairement	22

I.8.2	Influence de la température.....	22
I.9	L'effet de l'ombrage :	23
I.10	Les différentes connexions des systèmes photovoltaïques.....	24
I.10.1	Les systèmes autonomes	25
I.10.2	Les systèmes Hybrides	25
I.10.3	Les systèmes raccordés au réseau	26
I.11	Batteries d'accumulateurs :	26
I.11.1	La capacité.....	27
I.11.2	Rendement faradique (rendement en tension) :	27
I.11.3	Profondeur de décharge maximum :	27
I.11.4	Durée de vie :	27
I.11.5	Taux d'autodécharge :	28
I.11.6	Coût :	28
	Conclusion :	29

Chapitre II Convertisseurs statiques et commande et ses commandes ...**Error!**

Bookmark not defined.

Introduction	31
II.1 . Convertisseurs statiques	31
II.1.1 . Convertisseurs continu-continu (hacheurs) :	32
II.1.2 Convertisseur DC/AC (onduleur).....	46
II.1.3 La stratégie de commande DQ	54
II.1.4 Régulation des courants des boucles internes	54
II.1.5 Boucle de régulation de tension du buscontinu.....	55
II.1.6 La découplage Dq pour tension et courant.....	56
Conclusion.....	58

Chapitre III Simulation et évaluation des résultats.59

Introduction	Error! Bookmark not defined.
III.1 . Description du système photovoltaïque global :	60
III.1.1 Le panneau photovoltaïque:.....	61
III.1.2 Le hacheur boost :	68

III.1.3 Onduleur monophasé :	69
III.2 Etude et dimensionnement de notre projet:	70
III.3 Fonctionnement dans des conditions environnementales standard STC:	72
III.4 Fonctionnement dans des conditions environnementales variables :.....	77
III.4.1 Eclairage variable et température constante :.....	77
III.4.2 Eclairage constant et température variable :.....	82
III.5 Etude et simulation d'une charge inductive :	86
Conclusion :.....	88
Conclusion générale.....	90

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie solaire est de plus en plus essentielle et prometteuse en tant que source d'énergie pour répondre à la demande croissante en électricité et réduire l'impact environnemental des énergies fossiles. Les systèmes photovoltaïques jouent un rôle crucial dans la conversion de l'énergie solaire en électricité. Cependant, bien qu'ils aient un potentiel considérable, ces systèmes ont des limites en termes de performance, d'efficacité et de coûts, ce qui freine leur adoption à grande échelle. Par conséquent, il est primordial d'améliorer les performances et l'efficacité des installations photovoltaïques pour maximiser leur contribution à la production d'énergie renouvelable.[1-4-5]

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 transforment l'énergie solaire en énergie électrique en utilisant un ensemble de modules photovoltaïques et de composants électroniques qui ajustent l'électricité produite par les modules selon les 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 couplé avec un onduleur monophasé 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 générateur photovoltaïque dans le cas d'un site isolé, en utilisant un convertisseur statique à deux étages, 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 de bureau-type, en fournissant une présentation détaillée de sa conception et de son dimensionnement. 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, ainsi que les perspectives pour ce travail.

**Chapitre I Les
généralités sur les
systèmes
photovoltaïques**

Introduction :

Les systèmes photovoltaïques sont des systèmes électriques basés sur la technologie photovoltaïque qui convertissent l'énergie lumineuse en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Ce processus implique la génération de charges électriques dans les matériaux semi-conducteurs, tels que le silicium, lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Les systèmes photovoltaïques peuvent être installés en tant qu'unité isolée ou intégrés à d'autres systèmes, tels que les réseaux électriques. Ils sont un moyen efficace de générer de l'énergie propre et renouvelable à partir de la source inépuisable de lumière solaire.

I.1 L'énergie solaire :

I.1.1 Gisement solaire

Comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire à l'étude des systèmes photovoltaïques. Par gisement solaire, on entend ici les différentes caractéristiques du rayonnement solaire, susceptible d'influencer les performances d'un système en un lieu donné.[1]

I.1.2 Le rayonnement solaire:

Le rayonnement solaire désigne l'ensemble des radiations électromagnétiques émises par le Soleil et qui atteignent la Terre. Le rayonnement solaire est une source importante d'énergie pour la Terre, notamment pour la photosynthèse des plantes et la production d'énergie électrique à partir de systèmes photovoltaïques.

Il est constitué de photons d'énergie :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (I. 1)$$

Avec:

λ :Longueur d'onde.

h : Constante de Planck.

c : Célérité de la lumière.

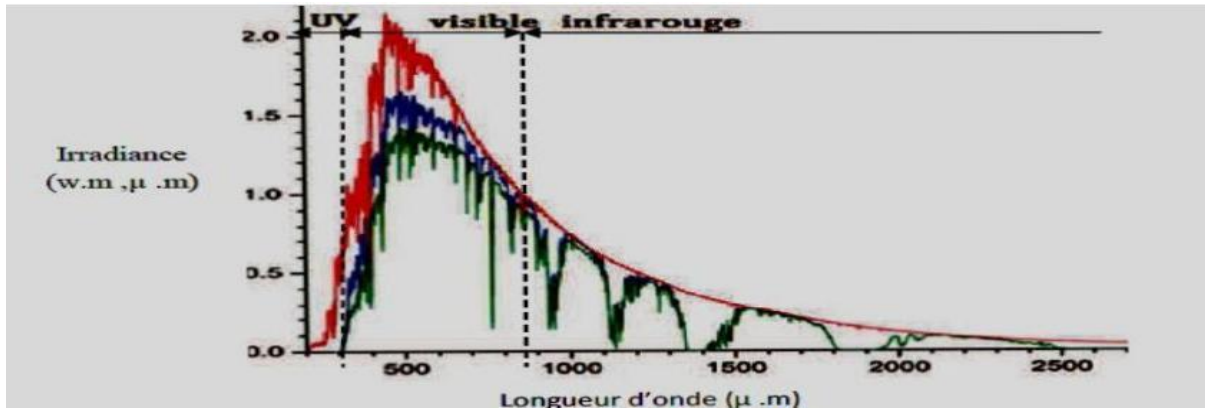


Figure I-1 Spectre du rayonnement solaire[4]

Il comprend différentes longueurs d'onde telles que la lumière visible, les infrarouges, les ultraviolets, les rayons X et les ondes radio.[1-2-3]

Les Rayonnements Au sol, on distingue plusieurs composantes :

I.1.2.1 Rayonnement direct

Rayonnement direct est reçu du Soleil en ligne droite, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, le rayonnement direct forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.[5]

I.1.2.2 Rayonnement réfléchi ou un albédo :

Rayonnement réfléchi ou un albédo est la partie réfléchi par le sol. Il dépend de l'environnement du site. La neige, par exemple, renvoie énormément de rayons lumineux alors qu'un asphalte n'en renvoie pratiquement aucun. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés. [5]

I.1.2.3 Le rayonnement global

Le rayonnement global au sol est donc fonction de la composition et de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons lumineux au cours de la journée. Il se décompose en rayonnement direct et rayonnement diffus, et ce sont ces deux rayonnements qui sont exploités par les générateurs solaires. [4]

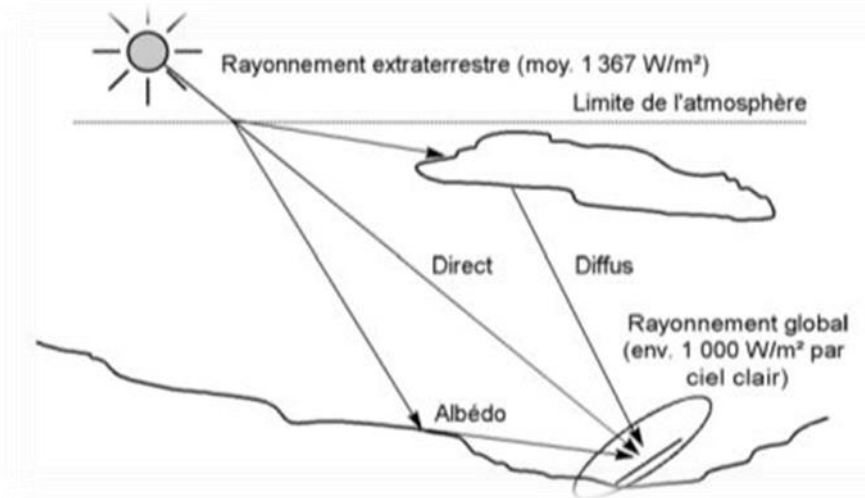


Figure I-2 Composantes du rayonnement solaire au sol.[3]

I.2 Durée d'insolation :

La durée d'ensoleillement ou durée d'insolation est un indicateur climatique qui mesure le temps pendant lequel un endroit, un lieu, est éclairé par le soleil sur une période donnée. Ceci exprime en quelque sorte la nébulosité et ne doit pas être confondu avec l'ensoleillement qui exprime la quantité d'énergie reçue par le rayonnement solaire sur une surface donnée et sur une certaine période. La durée d'ensoleillement est généralement exprimée en heures par an ou alors en une moyenne d'heures par jour. La mesure exprimée en heures/an indique le niveau d'ensoleillement d'un emplacement en comparaison avec les autres endroits de la terre alors que la dernière mesure exprimée en heures/jour permet la comparaison du niveau d'ensoleillement dans les différentes saisons au même endroit. Plus le nombre d'heures

d'ensoleillement est élevé, plus il fera beau, et plus les nuages et les brouillards se feront rares.[4]

I.3 L'effet photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule.

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs.[8]

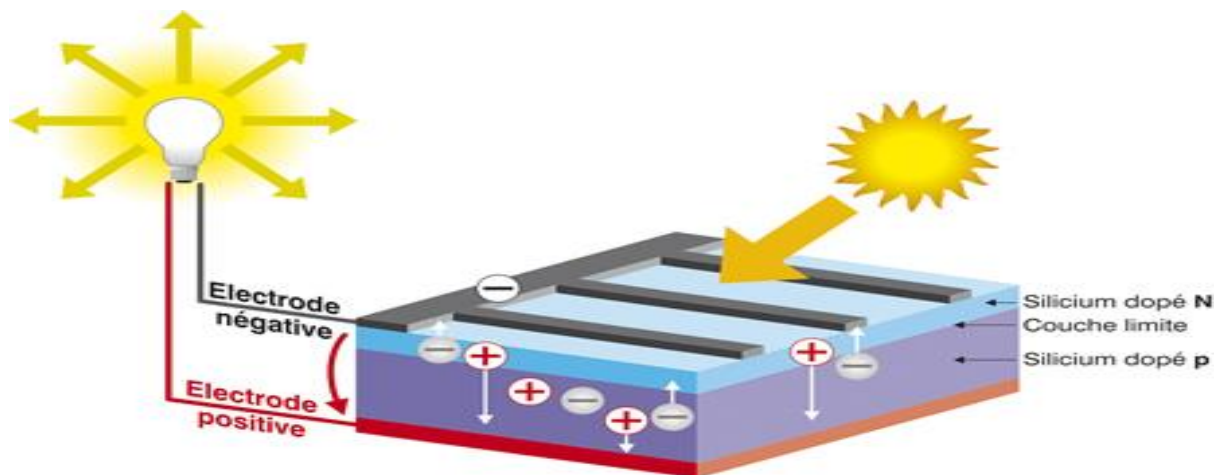


Figure I-3 Représentation schématique de l'effet photovoltaïque

I.4 La cellule photovoltaïque (photopile) :

La cellule photovoltaïque ou la photopile est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique.

Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.

Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multi-couches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement. [9]

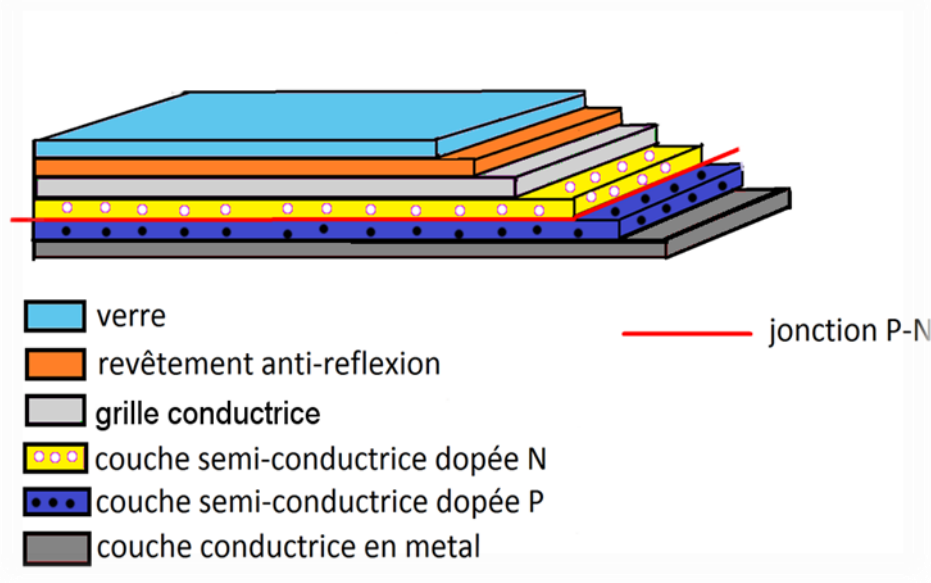


Figure I-4 Structure basique d'une cellule solaire.

I.4.1 Principe De Fonctionnement

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base de silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. [9]

I.4.2 Les différentes technologies des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible: de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle [11].

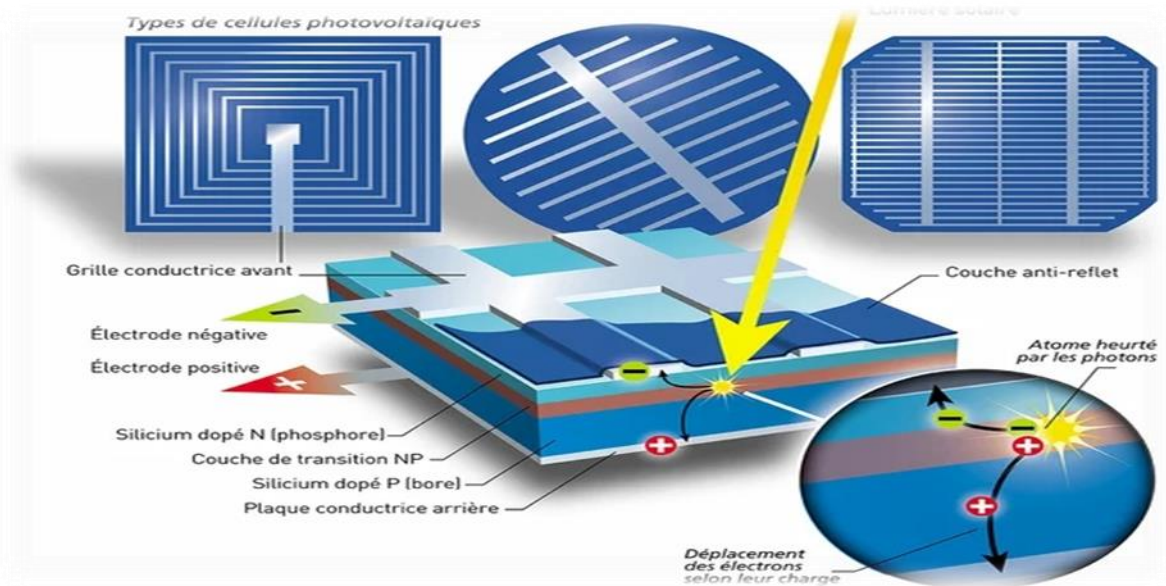


Figure I-5 Représentation schématique d'une cellule photovoltaïque

Cellules monocristallines: Ce sont les cellules les plus couramment utilisées pour la production d'énergie photovoltaïque. Elles sont fabriquées à partir de silicium monocristallin pur et ont une efficacité relativement élevée, allant jusqu'à 22%. [3]

Cellules polycristallines: Elles sont fabriquées à partir de silicium polycristallin et ont une efficacité inférieure à celle des cellules monocristallines, allant jusqu'à 17%. Cependant, elles sont plus abordables que les cellules monocristallines. [3]

Cellules à base de silicium amorphe: Elles sont fabriquées à partir de couches minces de silicium amorphe et ont une efficacité encore plus faible que les cellules polycristallines, allant jusqu'à 12%. Cependant, elles sont très souples et peuvent être facilement intégrées à des objets courbes ou en forme de coque. [3]

Cellules à base de cuivre, indium, gallium et sélénium (CIGS): Ce sont des cellules photovoltaïques à haut rendement qui ont une efficacité allant jusqu'à 21%. Elles sont fabriquées à partir de couches minces de matériaux de transition tels que le cuivre, l'indium, le gallium et le sélénium.

Cellules à base de pérovskite: Ce sont des cellules photovoltaïques récentes qui ont connu une croissance rapide en termes d'efficacité et de coût. Elles sont fabriquées à partir de cristaux de pérovskite et peuvent atteindre une efficacité allant jusqu'à 24%. [3]

Les cellules à jonctions multiples: ces cellules utilisent plusieurs couches de différents matériaux photovoltaïques pour capter plus de spectre solaire et augmenter l'efficacité. [3]

Les cellules sensibilisées à la couleur: ces cellules utilisent des colorants pour absorber la lumière et produire de l'énergie électrique. Elles sont souvent utilisées en combinaison avec d'autres matériaux photovoltaïques pour augmenter l'efficacité globale. [3]

Les cellules hybrides en film mince: ces cellules combinent des photovoltaïques en film mince avec d'autres matériaux, tels que le silicium, pour améliorer leur performance. [3]

Chaque technologie de cellule photovoltaïque a ses propres avantages et inconvénients en termes de coût, efficacité, durabilité et flexibilité, et le choix dépendra des exigences spécifiques de chaque application.

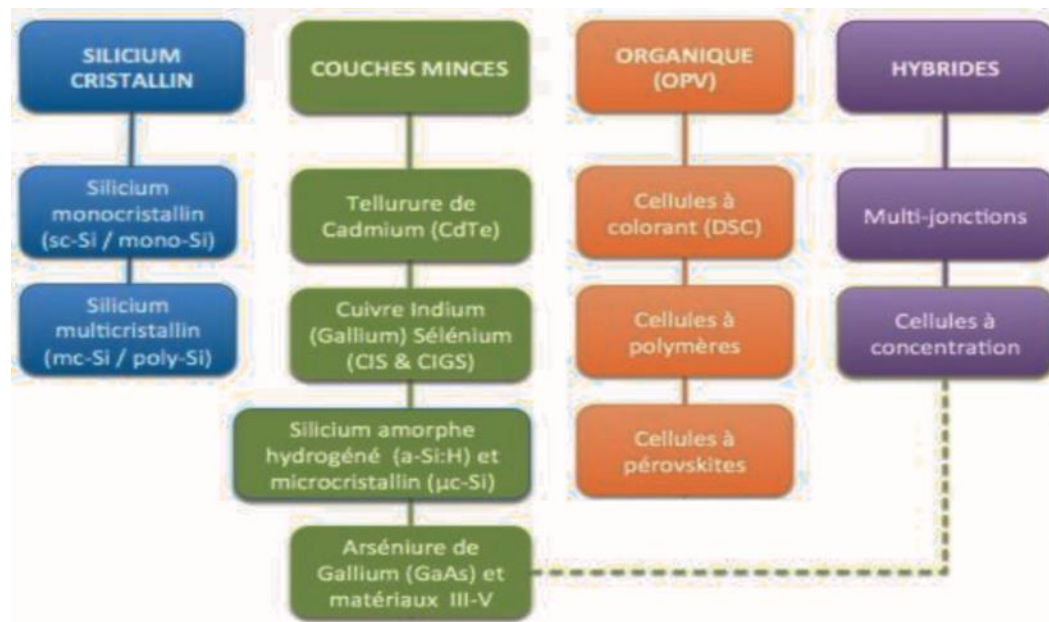


Figure I-6 différentes technologies des cellules photovoltaïques

I.4.3 Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire :

L'équivalent électrique et le modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque sont des outils utilisés pour comprendre et analyser le comportement de la cellule photovoltaïque. Le circuit équivalent représente le comportement électrique de la cellule photovoltaïque à travers un ensemble de composants électroniques, tels que les résistances séries ou parallèles et les diodes. Le modèle mathématique quant à lui, utilise des équations pour représenter la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par la cellule.

I.4.3.1 Générateur photovoltaïque idéal

Ensuite, nous allons passer au 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]

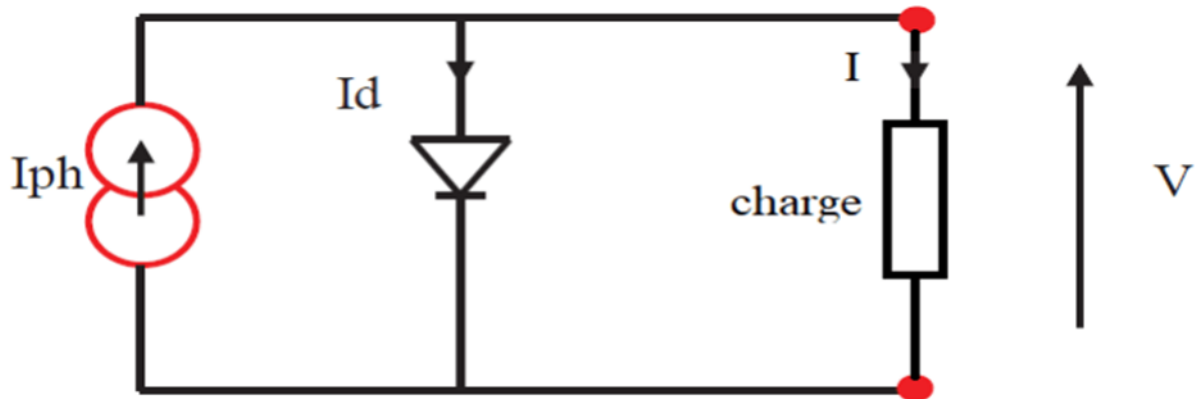


Figure I-7 Schéma du circuit équivalent simplifié d'une cellule photovoltaïque

Courant délivré par la cellule photovoltaïque délivre un courant à l'aide de l'éclairement pour la charge R s'écrit [9].

$$I = I_{ph} - I_d \quad (I.2)$$

I : courant fourni par la cellule

I_{ph} : Courant généré par la lumière incidente

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{aV_t}\right) - 1 \right] \text{ avec } V_t = \frac{k.T}{q}$$

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

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

a : Le facteur d'idéalité de la jonction

I_0 : Courant de saturation inversé 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.

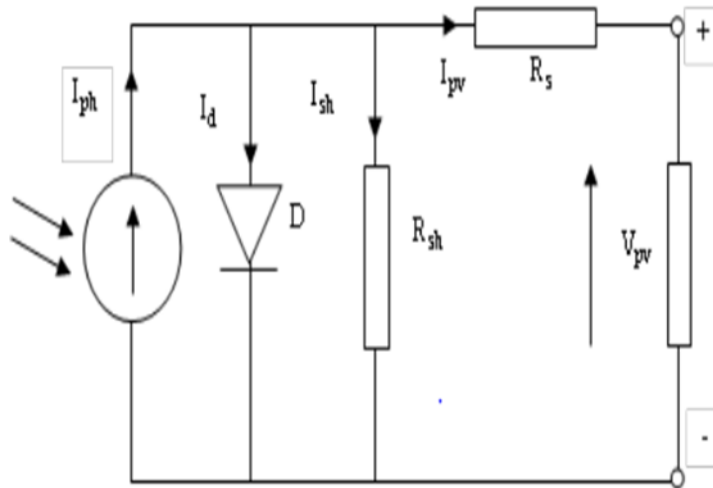


Figure I-8 Schéma électrique équivalent d'une cellule PV

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 borne de la diode étant égale à :

$$V_d = V_{pv} + R_s \cdot I_{pv} \quad (I.6)$$

Le courant de la diode représente le courant de fuite interne `a une cellule causée par la jonction P-N de la cellule et s'écrit [9].

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (I.7)$$

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

le courant de saturation inverse de la jonction I_s :

$$I_s = I_{sn} \left(\frac{T_c}{T_n} \right)^3 \cdot \exp\left(\frac{q \cdot E_g}{a \cdot k} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_c} \right) \right) \quad (I.8)$$

$$I_s = \frac{I_{ccn}}{e^{\frac{qV_{oc}}{aKT_1}} - 1} \quad (I.9)$$

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 :

$$I_{ph} = I_{cc} = \frac{G}{G_0} (I_{phn} + k_i(T_c - T_n)) \quad (I.10)$$

$$k_i = \frac{I_{cc}(T_2) - I_{cc}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (I.11)$$

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 :

$$T_c = T_a + \frac{T_n - 20}{800} G \quad (I.12)$$

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp^{\frac{q}{a.k.T_c}(v_{pv} + R_s \cdot I_{pv})} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (I.13)$$

Puissance fournie :

$$P = V_{pv} \cdot I_{pv} = V_{pv} \left(I_{ph} - I_s \left(\exp^{\frac{q}{a.k.T_c}(v_{pv} + R_s \cdot I_{pv})} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \right) \quad (I.14)$$

I.4.3.2 Paramètre des cellules photovoltaïques :

Les paramètres des cellules photovoltaïques (V_{oc} , I_{pv} , FF, η), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques. Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique.

Les plus usuels sont les suivantes.[12]

I.4.3.2.1 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. $(I_s \left(\exp^{\frac{q}{a.k.T_c}(v_{pv} + R_s I_{pv})} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}})$

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

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (I.15)$$

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'un la cellule).[12]

$$0 = I_{ph} - I_s \left(\exp^{\frac{q}{a.k.T_c}(v_{co})} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (I.16)$$

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

$$v_{oc} = \frac{q}{a.k.T_c} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (I.17)$$

Rendement énergétique :

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

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt} * V_{opt}}{P_{inc}} \quad (I.18)$$

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

I.4.3.2.1 Facteur de forme

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

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{cc} * V_{cc}} \quad (I.19)$$

I.5 Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle la nuit. [7]

I.6 Association des cellules

Les générateurs photovoltaïques sont réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires

I.6.1 Association en série

Une association de (N_s) cellule en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électriques d'une association série de (N_s) cellules. [4]

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

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

$I_{cc_{ns}}$: Courant de court-circuit de N_s cellules en série.

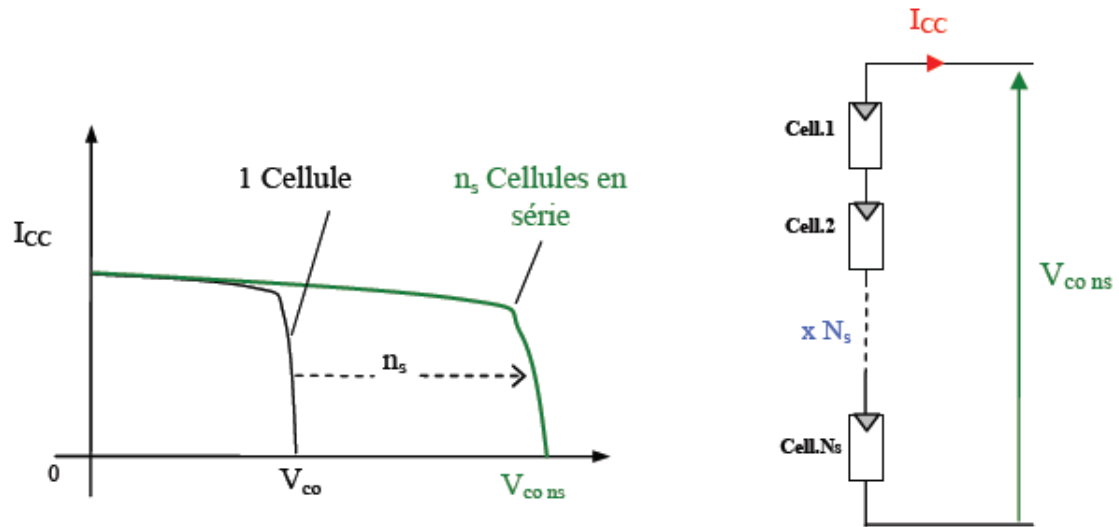


Figure I-9 Caractéristiques résultantes d'un groupement de n_s cellules en série

I.6.2 Association en parallèle

Une association parallèle de (N_p) cellule est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants. [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.

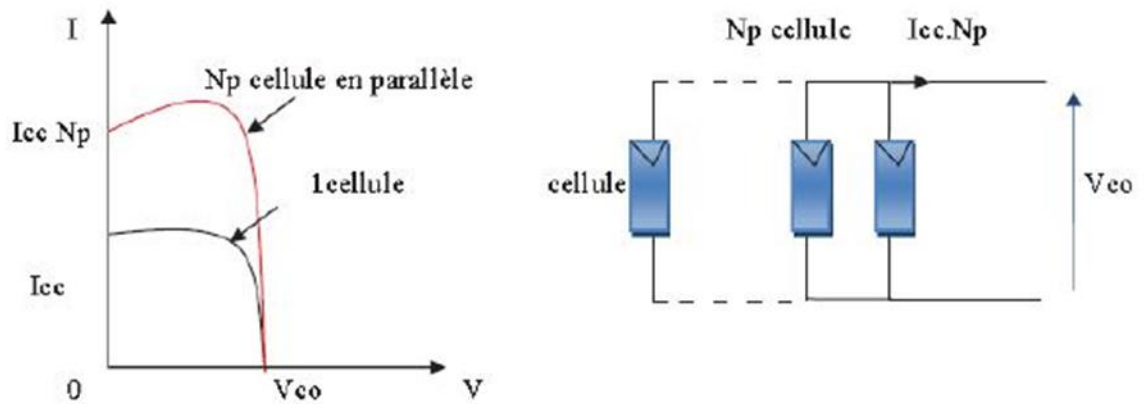


Figure I-10 Caractéristiques résultant d'un groupement de n_p cellules en parallèle

I.6.3 Association mixte (série parallèle)

Afin d'obtenir des puissances de quelques KW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque. [12]

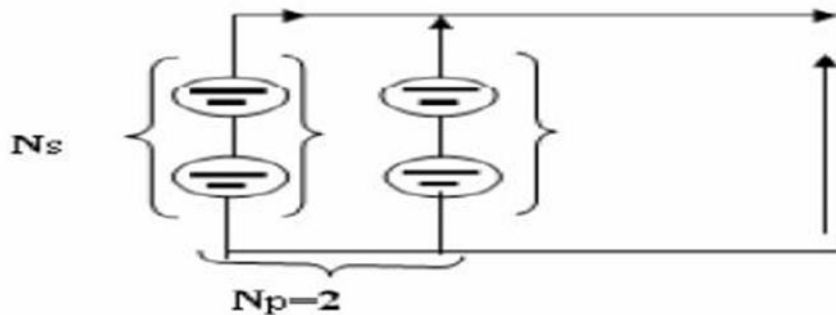


Figure I-11 Association mixte des modules.

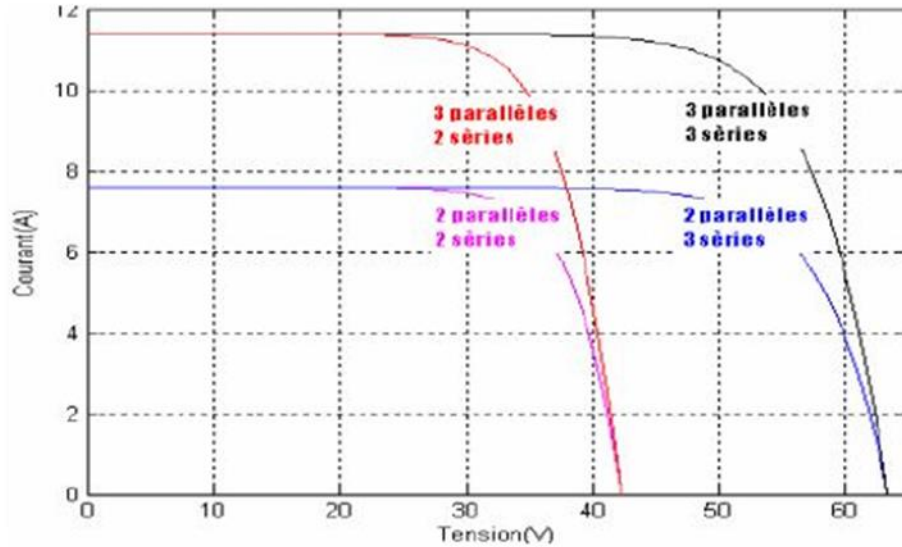


Figure I-12 Caractéristiques I-V pour l'association mixte.

I.6.4 Les caractéristiques et les problèmes potentiels des générateurs solaires.

Un générateur solaire est composé d'un réseau de cellules solaires connectées en série ou en parallèle. La caractéristique globale du générateur peut varier en fonction de l'éclairement, de la température, du vieillissement des cellules et des effets d'ombrage ou d'inhomogénéité de l'éclairement. Si l'une des cellules est occultée ou dégradée, cela peut entraîner une diminution significative du courant solaire produit par le générateur. Lorsque le courant débité est supérieur au courant produit par une cellule faiblement éclairée, la tension de cette cellule devient négative et elle devient un élément récepteur, ce qui peut entraîner la dissipation d'une quantité excessive de puissance électrique. Ce phénomène est appelé "hot spot" ou "point chaud". Si ce défaut persiste trop longtemps, cela peut conduire à la destruction de la cellule.

Pour remédier à ce phénomène, les panneaux solaires sont équipés de diodes by-pass, qui protègent les cellules défectueuses en les court-circuitant. Cependant, cette solution réduit la puissance délivrée par le générateur et la tension aux bornes du panneau. Ainsi, la

dégradation d'une seule cellule condamne le groupe de cellules associé à cette cellule défectueuse et protégée par la diode by-pass à ne pas produire de puissance. 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 problème sur une cellule, si le générateur fonctionne sans protections.[6]

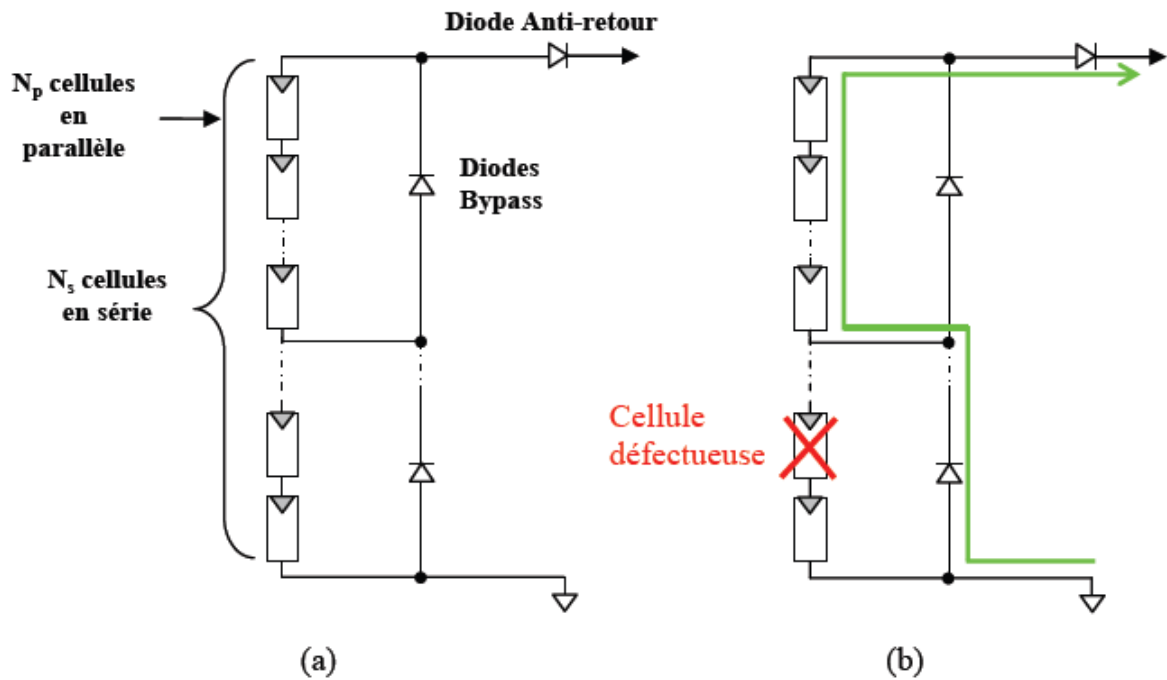


Figure I-13 (a) Architecture Classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protections

(b) Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode by-pass .[6]

I.7 Comportement d'un générateur photovoltaïque

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

I.7.1 Influence de l'éclairement

Bien entendu la production photovoltaïque d'un panneau dépend directement du flux lumineux reçu, puisque c'est sa source d'énergie. Mais tous les paramètres de la caractéristique ne sont pas affectés de la même manière. Dans la partie gauche des courbes (Figure I-14), on constate que le courant est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairement ($> 200 \text{ W/m}^2$). La tension par contre est moins dégradée lorsque la lumière baisse. [15]

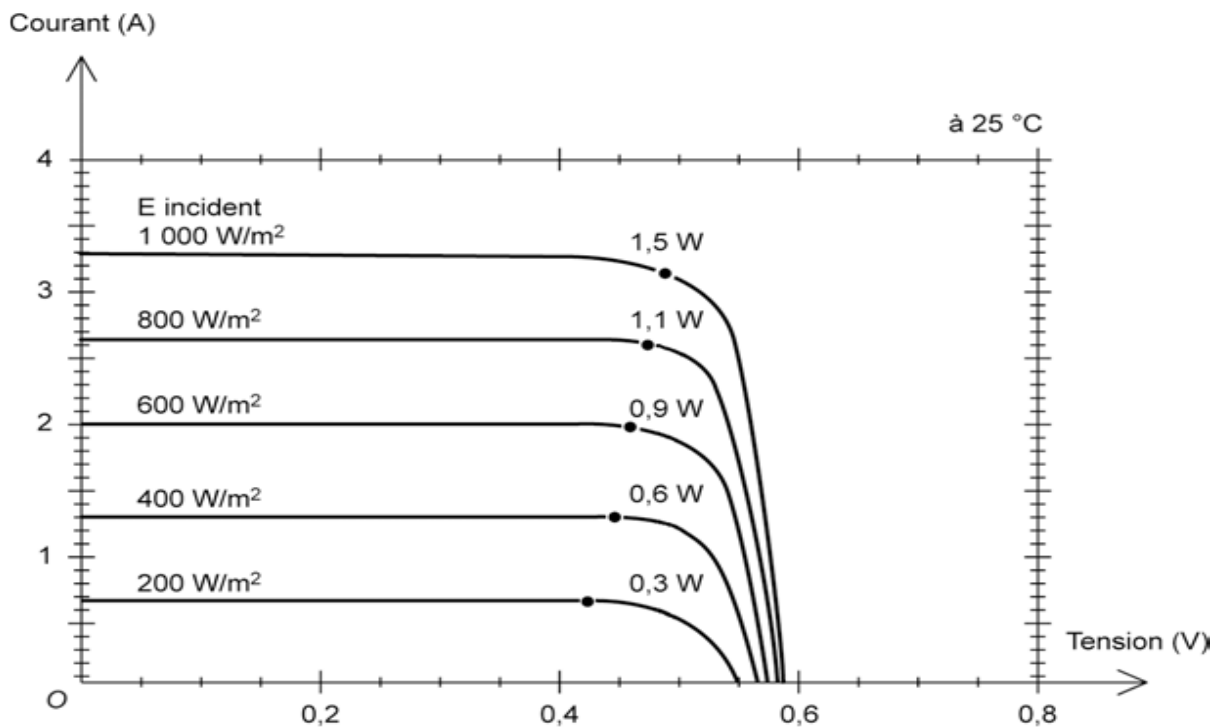


Figure I-14 Courbes I(V) sous diverses intensités de rayonnement d'une cellule [5].

I.7.2 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]

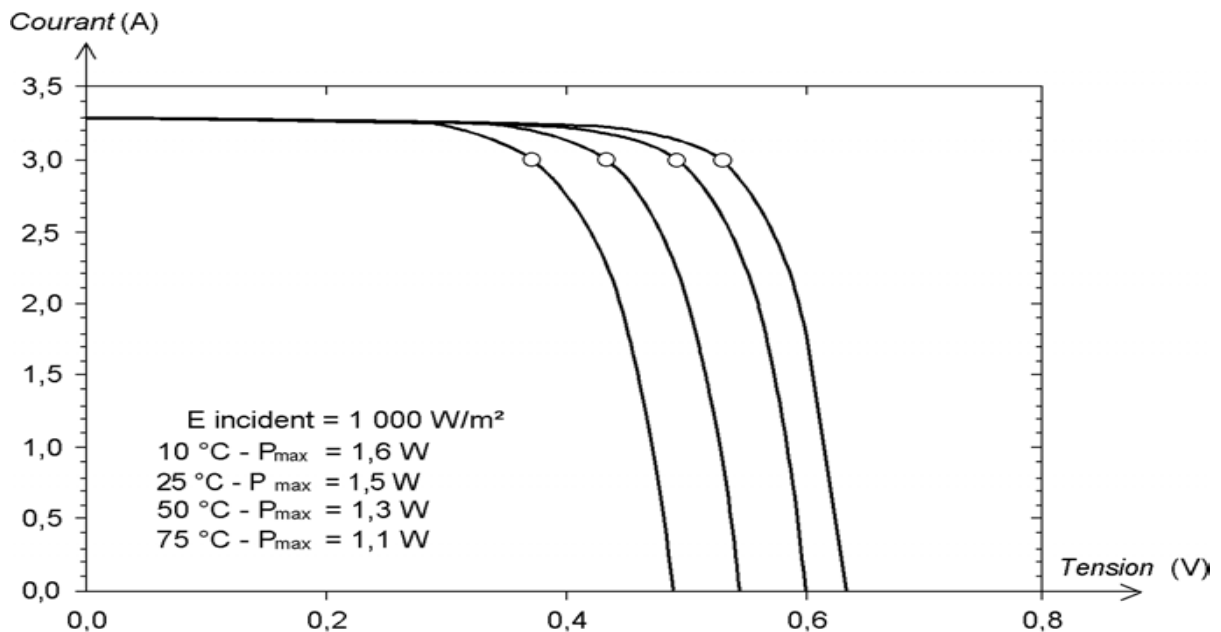


Figure I-15 Effet de la température sur la caractéristique I-V. [5]

I.8 L'effet de l'ombrage :

L'ombrage est constitué des ombres produites par des obstacles qui se situent entre les rayons solaires et les panneaux solaires photovoltaïques. Les propriétaires de panneaux solaires doivent faire face à l'ombre, qui peut provenir de bâtiments, d'arbres ou de feuillages. Cette ombre réduit la production d'énergie des panneaux solaires, et l'ampleur de cette perte dépend de la taille et de la densité de l'obstacle. Il est recommandé d'évaluer la perte potentielle avant d'installer les 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 important de noter que les cellules photovoltaïques sont montées en série. Ainsi, une cellule affaiblie aura un impact sur les performances des autres cellules. Par conséquent, si une rangée de cellules est complètement ombragée, cela peut rendre l'ensemble du module photovoltaïque inefficace.

Toutefois, les panneaux solaires photovoltaïques sont maintenant équipés de diodes de dérivation (by-pass), ce qui permet de limiter l'impact d'une ombre sur une partie du panneau.[12]

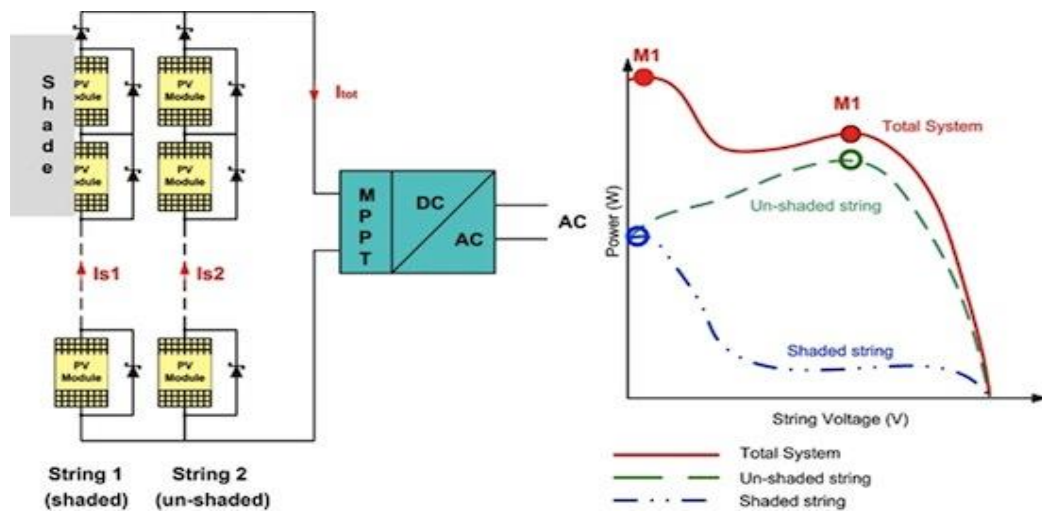


Figure I-16 représentation la différence de sortie du panneau solaire ombragé et non ombragé

I.9 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]

I.9.1 Les systèmes autonomes

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

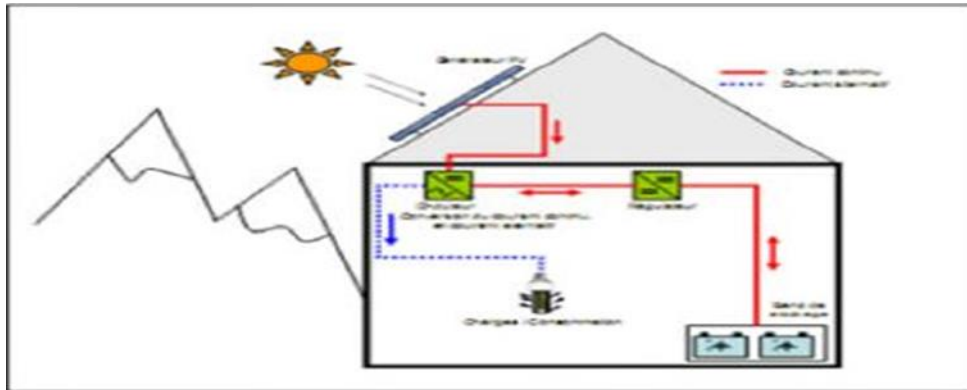


Figure I-17 Structure d'un système PV autonome.

I.9.2 Les systèmes Hybrides

Les systèmes photovoltaïques hybrides intègrent un générateur photovoltaïque et un autre générateur : éolien, groupe électrogène, système hydroélectrique et même parfois le réseau public d'électricité.[16]

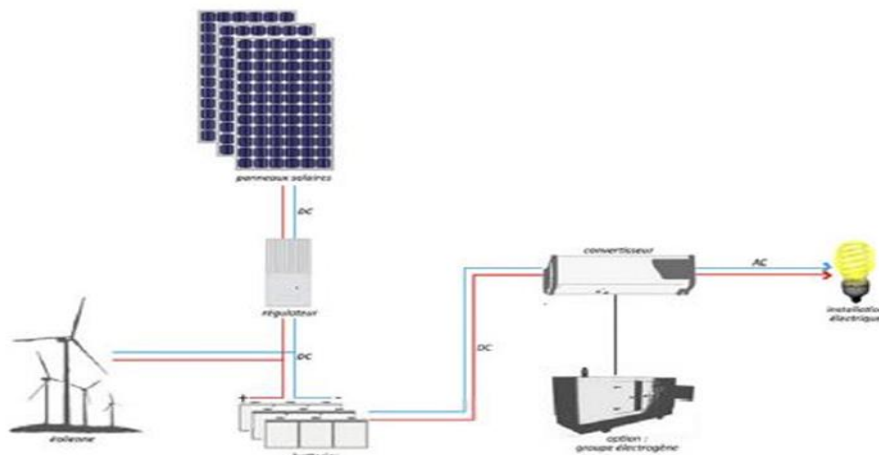


Figure I-18 Structure d'un système hybride.

I.9.3 Les systèmes raccordés au réseau

Un système photovoltaïque connecté au réseau, est un système raccordé directement au réseau électrique à l'aide de convertisseurs. Ce type de système offre beaucoup de facilités pour le (producteur/consommateur) puisque c'est le réseau qui se charge du maintien de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité.[16]

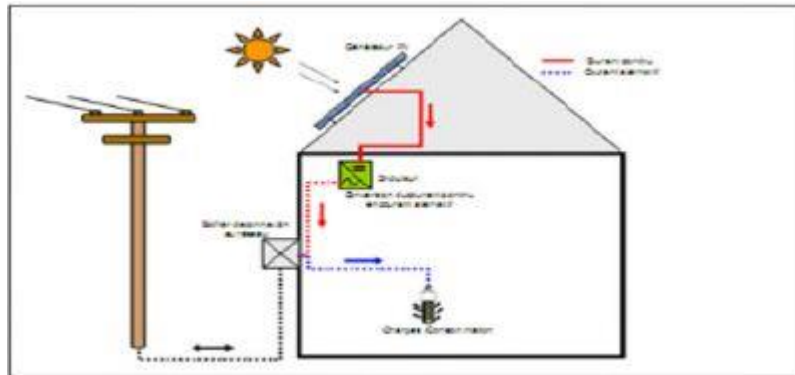


Figure I-19 Structure d'un système photovoltaïque connecté au réseau.

I.10 Batteries d'accumulateurs :

Si un système hors réseau doit fournir de l'énergie à la demande et non seulement lorsqu'il y a du soleil, des batteries d'accumulateurs sont requises pour stocker l'énergie. L'accumulateur d'usage le plus courant est du type plomb-acide et comprend deux catégories :

les accumulateurs plomb-calcium et les accumulateurs plomb-antimoine. La première grande utilisation du PV ayant été la recharge de batteries d'accumulateurs, la plupart des modules sur le marché sont conçus pour fournir une tension continue (CC) de l'ordre de 12 Volts.

Les accumulateurs nickel-cadmium peuvent aussi être utilisés, plus particulièrement s'ils doivent subir des écarts importants de température. À cause de la nature variable des aditions solaires, les accumulateurs doivent pouvoir résister sans dommage à de nombreux cycles de charge et de décharge. La profondeur de décharge auquel un accumulateur peut être soumis

dépend de son type. Ainsi, les accumulateurs plomb-calcium sont utilisés pour des applications où la décharge est inférieure à 20 % par cycle (décharge faible). Les accumulateurs nickel-cadmium et quelques types d'accumulateurs plomb-antimoine, peuvent être utilisés pour des applications où la décharge pourrait excéder 80 % (décharge profonde).[12]

I.10.1 La capacité

La capacité représente la quantité d'électricité qu'une batterie peut délivrer pendant une période de temps donnée sous un régime de décharge et une température ambiante donnée. La capacité diminue avec la température, avec des taux de décharge plus élevés et avec l'âge. Elle s'exprime en A/H (ampère-heure).[12]

I.10.2 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. Le rendement en tension est le rapport entre la tension délivrée par la batterie lors de la décharge et la tension de charge.[12]

I.10.3 Profondeur de décharge maximum :

La profondeur de décharge maximum représente le maximum en pourcentage de la capacité nominale au-delà de laquelle la décharge n'est plus souhaitable. Dans une installation solaire, la décharge journalière moyenne correspond au déficit entre la production et la consommation journalière (idem pour décharge saisonnière). La profondeur de décharge maximum se situera en hiver, son seuil ne doit pas être dépassé et il se situe en général entre 50 et 80% de la capacité pour les batteries Pb/acide généralement utilisées dans les installations photovoltaïques (voir notice constructeur).[12]

I.10.4 Durée de vie :

Elle est caractérisée par le nombre de cycles charge /décharge qu'elle supporte tout en gardant sa capacité. On peut alors parler d'ampère-heure cycle. La batterie STECO 3000 (voir notice constructeur en annexe) de 105 Ah sous 12V autorise 30000 ampère-heure cycle soit 600 cycles à 50% de décharge ou 1000 cycles à 30% de décharge. La performance en cyclage

dépend de la profondeur de décharge; pour cette raison, dans une installation PV, le taux de décharge journalier ne doit guère dépasser les 10% de la capacité.[12]

I.10.5 Taux d'autodécharge :

C'est le taux en pourcentage d'énergie perdue quand la batterie est au repos. Un taux d'autodécharge trop élevé diminue les performances d'un système PV. Il est fonction de la nature des matériels utilisés dans la fabrication des plaques positives et négatives de la batterie; les plaques utilisant le Pb calcium induisent un taux d'autodécharge plus faible que celles utilisant le Pb antimoine.[12]

I.10.6 Coût :

C'est souvent le coût qui détermine le choix de la batterie. Bien que les batteries Cad/nickel offrent de bien meilleures performances que les batteries Pb/acide, elles sont très peu utilisées dans les applications PV classiques car leur coût initial est bien plus élevé. Par contre, elles conviennent parfaitement pour des applications où la température ambiante est très basse.

Critères de sélection d'une batterie.

- caractéristiques de charge, résistance interne
- autonomie, maximum de profondeur de décharge
- taux de décharge max, d'autodécharge
- température du lieu d'installation
- durée de vie estimée
- périodicité et nature de la maintenance
- Type: étanche ou pas
- poids, taille, densité de stockage énergétique
- visualisation aisée ou non du niveau d'électrolyte
- Etat des bornes de connexion (connexion aisée ou pas)
- Réputation du constructeur, coût et garantie.[12]

Conclusion :

Ce chapitre est consacré à la modélisation d'un générateur photovoltaïque. Nous avons étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la composition de la cellule PV et ses différents paramètres. En suite nous avons présenter et expliquer les différentes caractéristiques d'un générateur photovoltaïque pour voir l'influence de certains paramètres sur les performances du générateur.

Chapitre II

Conception et

Commande des

Convertisseurs

Statiques

Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus prometteuses pour répondre aux besoins en énergie de notre société.

Les systèmes photovoltaïques se composent généralement de panneaux solaires, de convertisseurs statiques et de dispositifs de stockage de l'énergie. Les convertisseurs statiques sont des éléments clés des systèmes photovoltaïques car ils permettent de convertir et de réguler l'énergie électrique produite par les panneaux solaires. La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est également une fonction importante des convertisseurs statiques, car elle permet d'optimiser la production d'énergie des panneaux solaires.

Dans ce chapitre, on étudie les convertisseurs statiques, en particulier les convertisseurs DC/DC et le hacheur boost et convertisseurs DC/AC et l'onduleur, couramment utilisés dans les systèmes photovoltaïques.

Ce chapitre contribuera à une meilleure compréhension des convertisseurs statiques et de leurs commandes, qui sont des éléments essentiels pour maximiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques.

II.1 . Convertisseurs statiques

Les convertisseurs sont des appareils qui servent à transformer une tension continue fournie par des panneaux ou des batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une autre alternative. L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée, et connectée au réseau (éolien, photovoltaïque, ou à pile à combustible...).

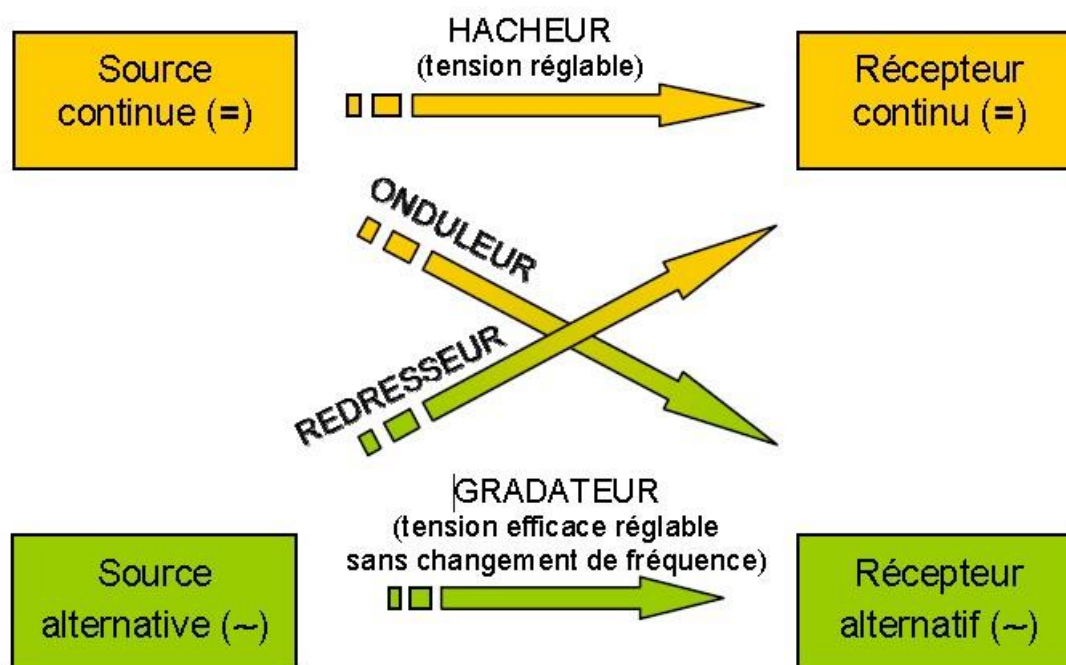


Figure II-1 Différents types de convertisseurs statiques

II.1.1 . Convertisseurs continu-continu (hacheurs) :

Le hacheur est un dispositif qui convertit une source d'énergie continue à un certain niveau de tension (ou courant) en une énergie continue à un niveau différent de tension (ou courant). Il est essentiel pour stocker l'énergie produite par des panneaux solaires dans des batteries ou pour alimenter des charges qui nécessitent une alimentation continue. Le hacheur se compose de commutateurs, d'inductance et condensateur. Les hacheurs sont des convertisseurs continus qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation. [4,9,17]

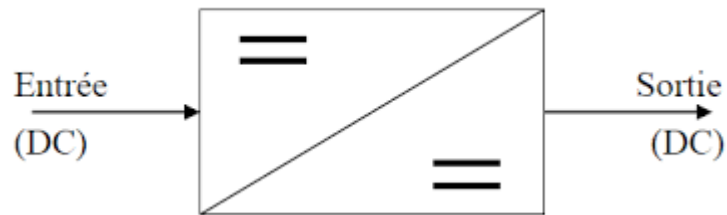


Figure II-2 Symbole d'un convertisseur DC-DC

II.1.1.1 Type des hacheurs :

Il existe différents types de hacheurs utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges. C'est là le plus important de ces trois types des convertisseurs à découpage (Buck, Boost et mixte).[17]

II.1.1.1.1 Hacheur Buck (abaisseur)

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

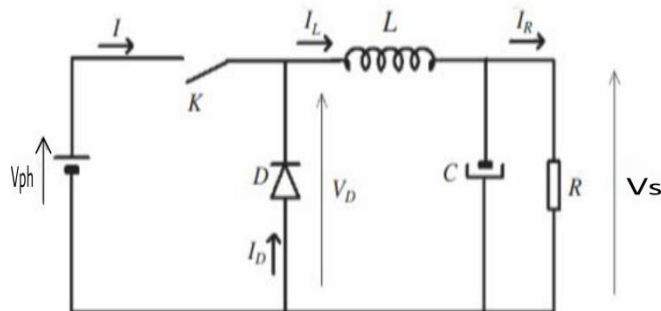


Figure II-3 Schéma d'un hacheur Buck (abaisseur)

Principe de fonctionnement

Le hacheur Buck est un dispositif utilisé pour convertir une tension d'entrée DC en une tension de sortie DC plus basse. Il utilise un interrupteur qui est contrôlé par une onde de commande, souvent un MOSFET ou un transistor bipolaire, et qui est commuté à une fréquence élevée. L'interrupteur est généralement constitué de transistors MOSFET de puissance de canal N, et il est commandé à la fréquence de découpage $f=1/T$. Pendant la durée αT où l'interrupteur est fermé, 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 de la Figure II-4 sont tracés dans le cas d'une conduction continue, ce qui signifie que le courant ne repasse jamais par zéro. [18]

Pour déterminer la relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle :

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

$$V_s = a \cdot V_{ph} \quad (II.2)$$

A pertes minimales on a :

$$P = P_s \Leftrightarrow V_s \cdot I_s = V_{ph} \cdot I \Leftrightarrow I = \frac{V_s}{V_{ph}} I_s \Leftrightarrow I = \alpha \cdot I_s \quad (II.3)$$

Avec le rapport cyclique a est défini comme étant le rapport entre la durée (t_{on}) pendant laquelle (K) est fermé dans un période (T)

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T}, 0 < \alpha < 1 \quad (II.4)$$

Donc le rapport cyclique s'égale

$$\alpha = \frac{V_s}{V_{ph}} = \frac{I_s}{I} \quad (II.5)$$

Dans les 2 types de fonctionnement, on remarque que la tension de la charge (V_o) dépend du rapport cyclique (α). Donc, pour régler la tension (V_o), la valeur de rapport cyclique (α) doit être modifiée.

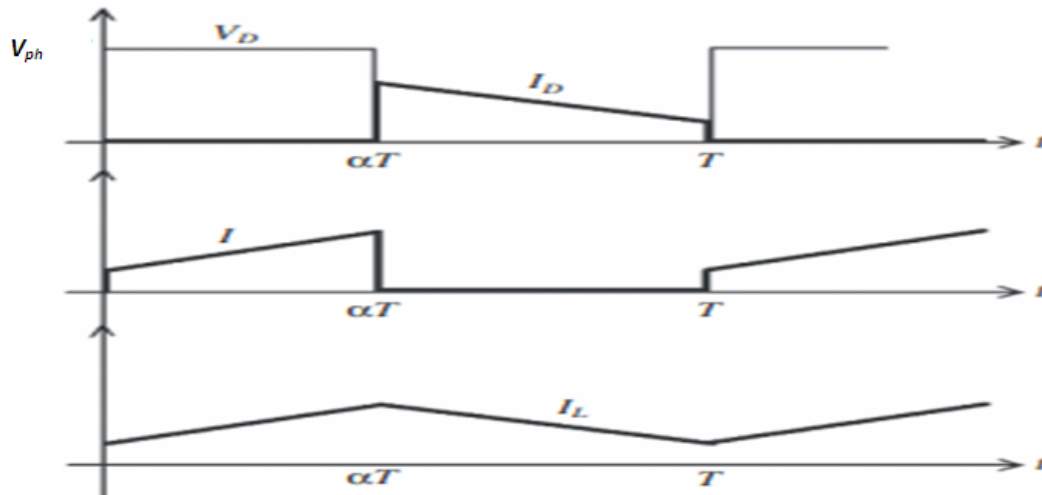


Figure II-4 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Buck

II.1.1.1.2 Hacheur élévateur (Boost)

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à droite du MPP. [20]

Ce convertisseur est une alimentation à découpage élévateur qui permet d'avoir une tension de sortie supérieure à celle de l'entrée

La Figure II-4 illustre un système photovoltaïque adapté par un hacheur de type Boost alimentant une charge résistive R.

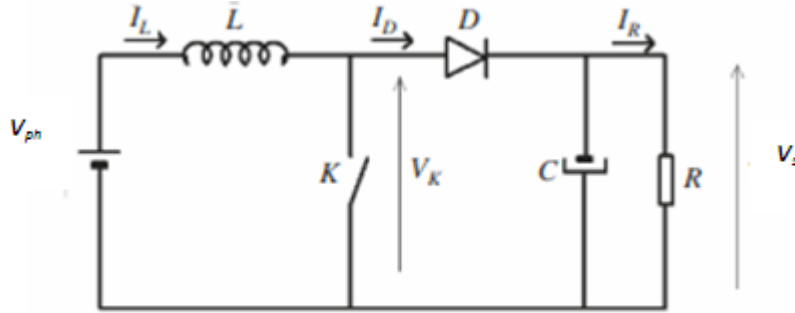


Figure II-4 Schéma d'un hacheur Boost (élevateur)

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps $\in [\alpha T, T]$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors $V_k = V_s$. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à

$$V_{ph} = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} V_s dt \quad (II.6)$$

$$V_{ph} = V_s(1 - a) = \frac{V_s}{1 - a} \quad (II.7)$$

A pertes minimales on a :

$$P_s = P \Leftrightarrow V_c \cdot I_c = V_{ph} \cdot I \Leftrightarrow I_c = \frac{V_{ph}}{V_c} \cdot I_{pv} \Leftrightarrow I_c = (1 - \alpha) \cdot I_{ph} \quad (II.8)$$

Donc

$$(1 - \alpha) = \frac{V_{pv}}{V_s} = \frac{I_s}{I_{ph}} \quad (II.9)$$

Le montage est élévateur de tension.

On remarque que la régulation de la tension de sortie (V_s) se fait en contrôlant le rapport cyclique (a).

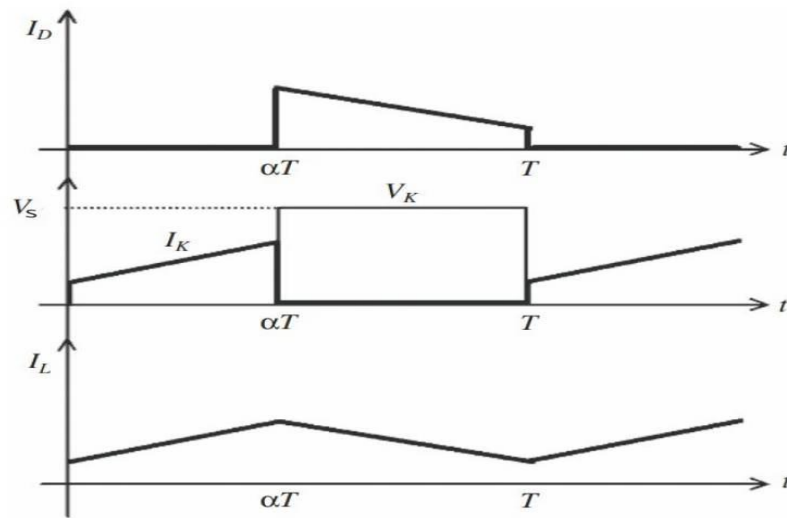


Figure II-5 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Boost

Hacheur à stockage inductif ou BUCK-BOOST

Le hacheur buck-boost est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage captatif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage)[9].

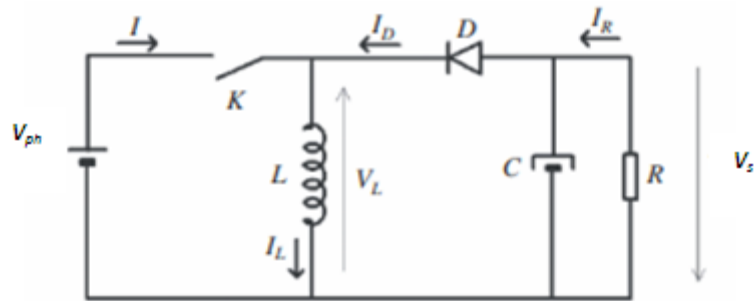


Figure II-6 Schéma électrique d'un hacheur buck- boost

Principe de fonctionnement

Cette structure de convertisseur permet d'obtenir des tensions négatives à partir de tension positive. Le schéma de principe est présenté Figure II-7. Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT , le courant augmente linéairement. La tension V_L est égale à V_{pv} . À l'ouverture de K, la diode prend le relais et la tension V_L est égale à $-V_o$. La tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle, Il en résulte que [9] :

Quand le rapport cyclique $\alpha > 0.5$ le hacheurbuck-boost fonction comme un hacheur boost
Et si le rapport cyclique $\alpha < 0.5$ le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur buck.

$$V_{ph} \cdot \alpha \cdot T = V_s \cdot (1 - \alpha) \cdot T \quad (II.10)$$

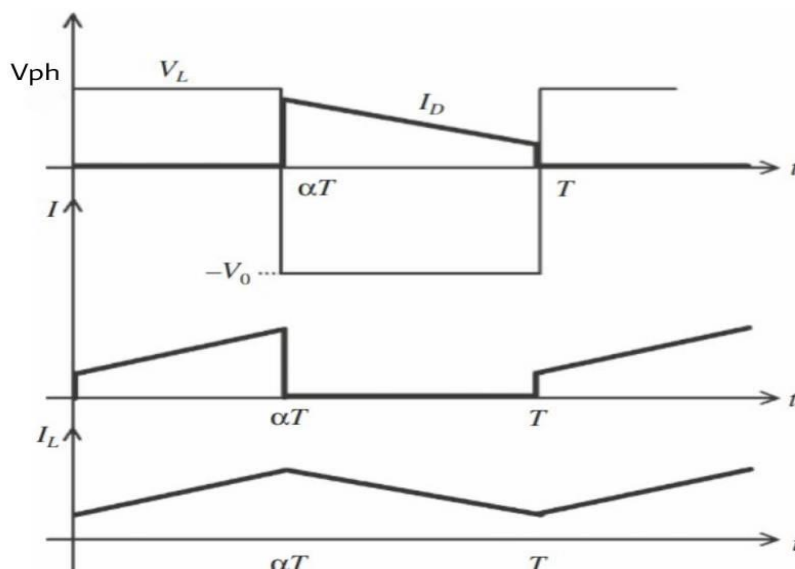


Figure II-8 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Buck-Boost

II.1.1.2 Le choix de convertisseur DC/DC

Dans notre travail nous avons choisis un convertisseur DC/DC élévateur (boost), car il a une structure simple, et un gain en tension plus élevé que les autres pour un rapport cyclique donné. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge lorsque la charge a besoin d'une tension supérieure à la tension délivrée par le panneau.

II.1.1.2.1 Dimensionnement des paramètres du hacheur Boost:

Les calculs des paramètres du hacheur Boost se fait à l'aide des formules ci-dessous :

Le rapport cyclique α :

$$V_{ph} = V_s \frac{1}{1 - \alpha} \Leftrightarrow \alpha = 1 - \frac{V_{pv}}{V_s} \quad (II.11)$$

Résistance R :

$$P = \frac{V_s^2}{R} \Leftrightarrow R = \frac{V_s^2}{P_s} \quad (II.12)$$

L'inductance L :

Nous aurons ainsi :

$$\Delta i_L = \frac{1}{2} (i_L(\alpha.Ts) - i_L(0)) \quad (II.13)$$

Ainsi l'inductance (L) peut être calculée comme suit :

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \Leftrightarrow V_{ph} = L \frac{di_L}{dt} \quad (II.14)$$

En utilisant $V_{L(t)} = V_{ph}$ dans le premier sous-intervalle. Le courant i_L de la première période est donné par :

$$i_L(\alpha.T) = i_L(0) + V_{ph}L(\alpha.T) \quad (II.15)$$

Si on remplace ce dernier dans la première équation on obtient

$$\Delta i_L = \frac{1}{2} V_{ph}L (\alpha.T) \quad (II.16)$$

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

$$L = \frac{V_{pv}}{2. \Delta i_L. f} \alpha \quad (II.17)$$

Capacité C :

Nous aurons ainsi :

$$i_s = c \frac{dV_s}{dt} \quad (II.18)$$

En calculant :

$$\int_{\Delta T}^T V_s = \frac{1}{C} \int_0^{aT} i dt \quad (II.19)$$

Nous obtenons :

$$-2\Delta V_s = \frac{-1}{c} \frac{V_s}{R} \alpha T \Leftrightarrow C = \frac{V_s}{2\Delta V_s R f} \alpha \quad (II.20)$$

II.1.1.3 Simulation du hacheur Boost

- Schéma bloc de simulation du convertisseur élévateur :

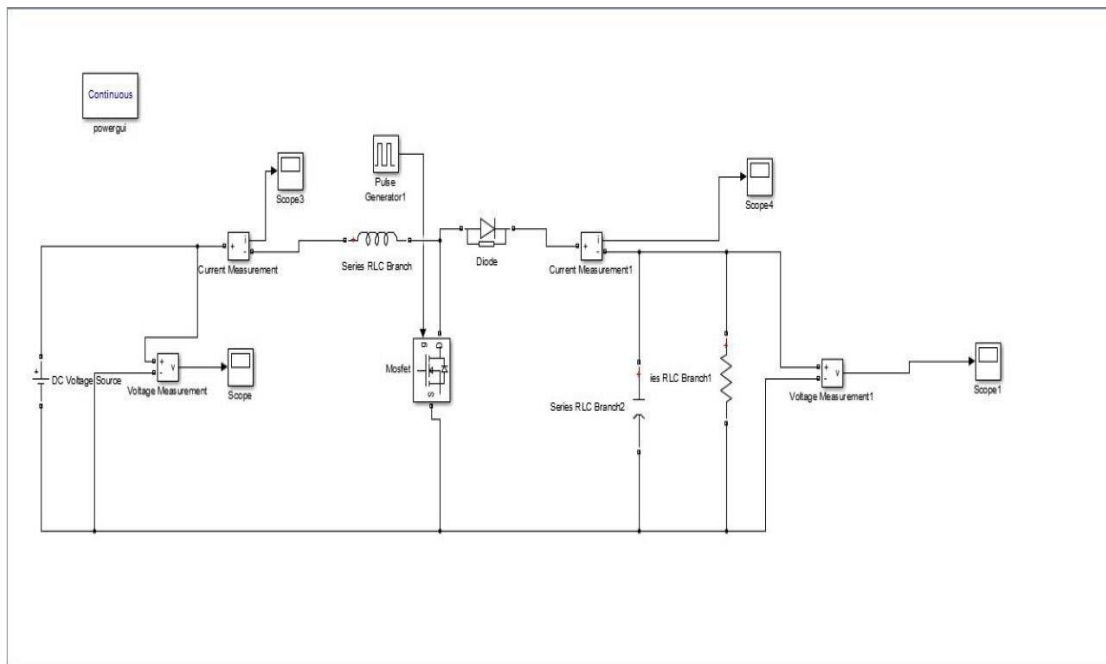


Figure II-9. Schéma bloc de simulation du convertisseur Boost

- **Résultats de la simulation :**

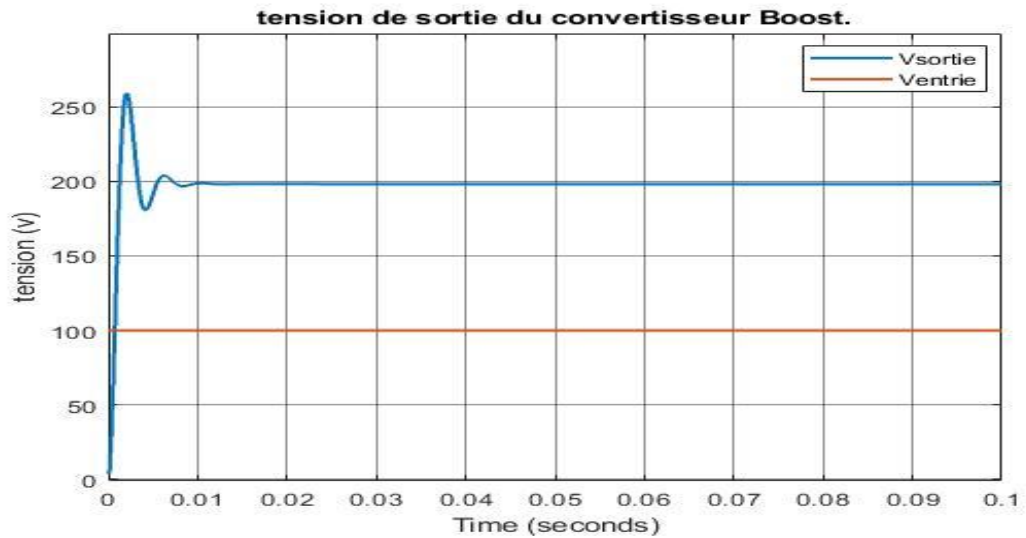


Figure II-10 Tension de sortie du convertisseur Boost.

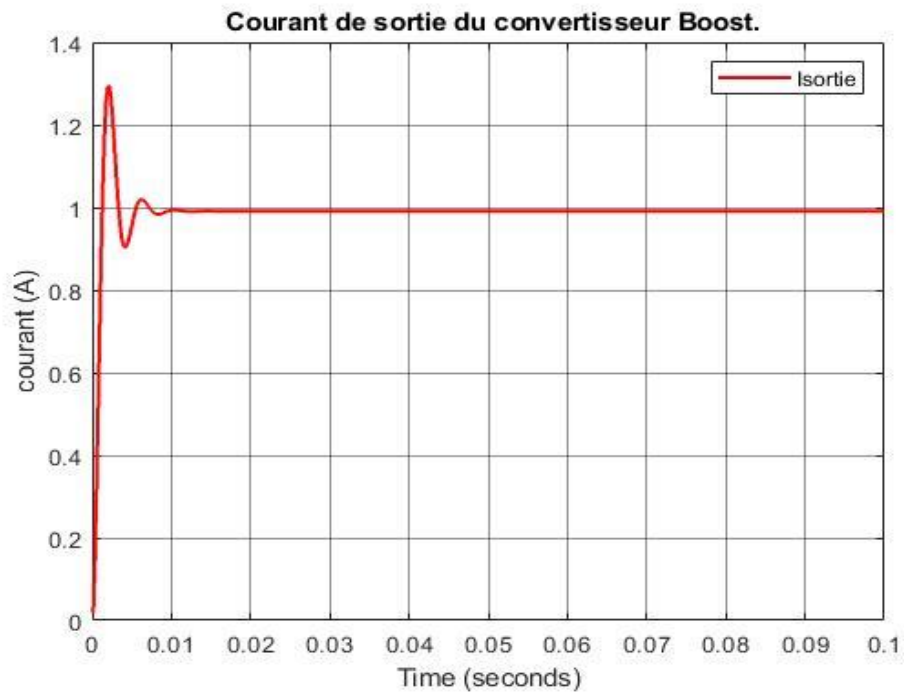


Figure II-11 Courant de sortie du convertisseur Boost.

- **Interprétation des résultats :**

Ces figures représentent les tensions d'entrée et de sortie d'un convertisseur boost et le courant de sortie de le hacheur. Les résultats montrent que la tension de sortie du convertisseur boost est supérieure à la tension d'entrée. Le convertisseur boost fait donc bien son travail.

II.1.1.4 Commande MPPT

Le MPPT est un algorithme utilisé dans les convertisseurs DC-DC pour maximiser la production d'énergie des panneaux solaires en ajustant la tension de charge en fonction des différents facteurs tels que le rayonnement solaire, la température ambiante et la température du panneau. Afin d'obtenir la puissance maximale du panneau solaire. Cela permet de tirer le meilleur parti possible de l'énergie produite par les panneaux solaires et peut être très utile pour alimenter des équipements à distance.

En général, un convertisseur DC/DC est placé entre la PV et la charge, et en faisant varier le rapport cyclique du point de fonctionnement. [5-9-21]

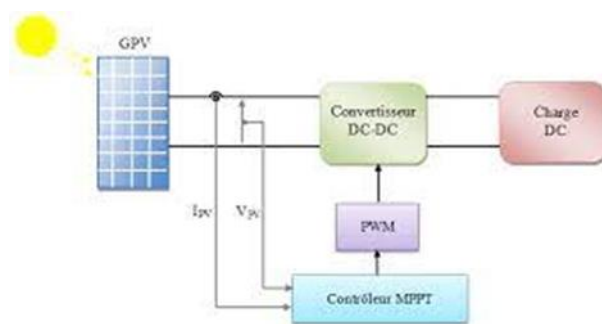


Figure II-12 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec une commande MPPT

II.1.1.4.1 Principe de la MPPT

MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une technique utilisée pour maximiser la quantité d'énergie que l'on peut obtenir à partir de sources d'énergie qui varient, dans les systèmes solaires photovoltaïques (PV). Pour comprendre comment fonctionne le MPPT, il

faut savoir qu'il suit la tension et le courant d'un module solaire pour savoir quand survient la puissance maximale. Le principe de base du MPPT est de faire fonctionner le module PV à la tension la plus efficace, qui correspond au point de puissance maximale. Pour y arriver, le MPPT est un système électronique qui ajuste le point de fonctionnement électrique des modules de manière à ce qu'ils fournissent la puissance disponible maximale. Pour ce faire, il utilise un convertisseur DC-DC qui transforme l'entrée DC d'un module PV en AC, puis en une tension et un courant DC différents. Le régulateur de charge solaire MPPT est nécessaire pour tout système d'énergie solaire.

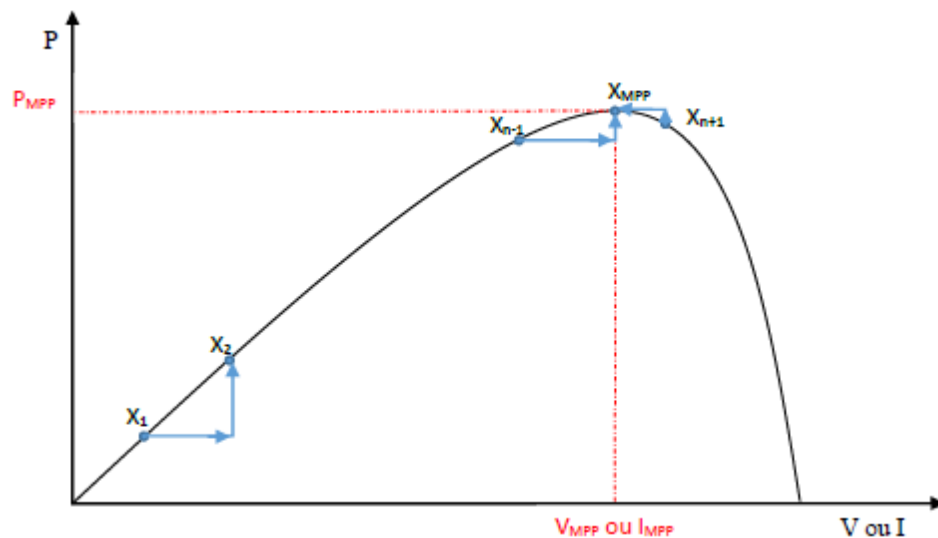


Figure II-13 Schéma de principe du convertisseur MPPT

II.1.1.4.2 Les différentes techniques de MPPT

Dans la littérature, il existe différents types d'algorithmes effectuant la recherche du point de puissance maximale :

- Perturbation et observation.
- La méthode d'incrément de la conductance.
- Méthode de capacité parasite.

Dans notre travail, on se limite à la méthode de Perturbation et observation (P&O), qui est très simple à implanter, et de bon rendement.

II.1.1.4.3 Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

la méthode P&O, qui est une technique couramment utilisée dans le domaine des techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT).

Cette méthode est appréciée pour sa simplicité, car elle ne nécessite que la mesure de la tension de sortie du panneau solaire (V_{pv}) et de son courant de sortie (I_{pv}).[22] La méthode P&O fonctionne en perturbant la tension de sortie du panneau solaire et en observant l'impact de cette perturbation sur le changement de la puissance de sortie du panneau. La méthode génère ensuite une tension de référence (V_{ref}) pour atteindre le point de puissance maximale.[9]

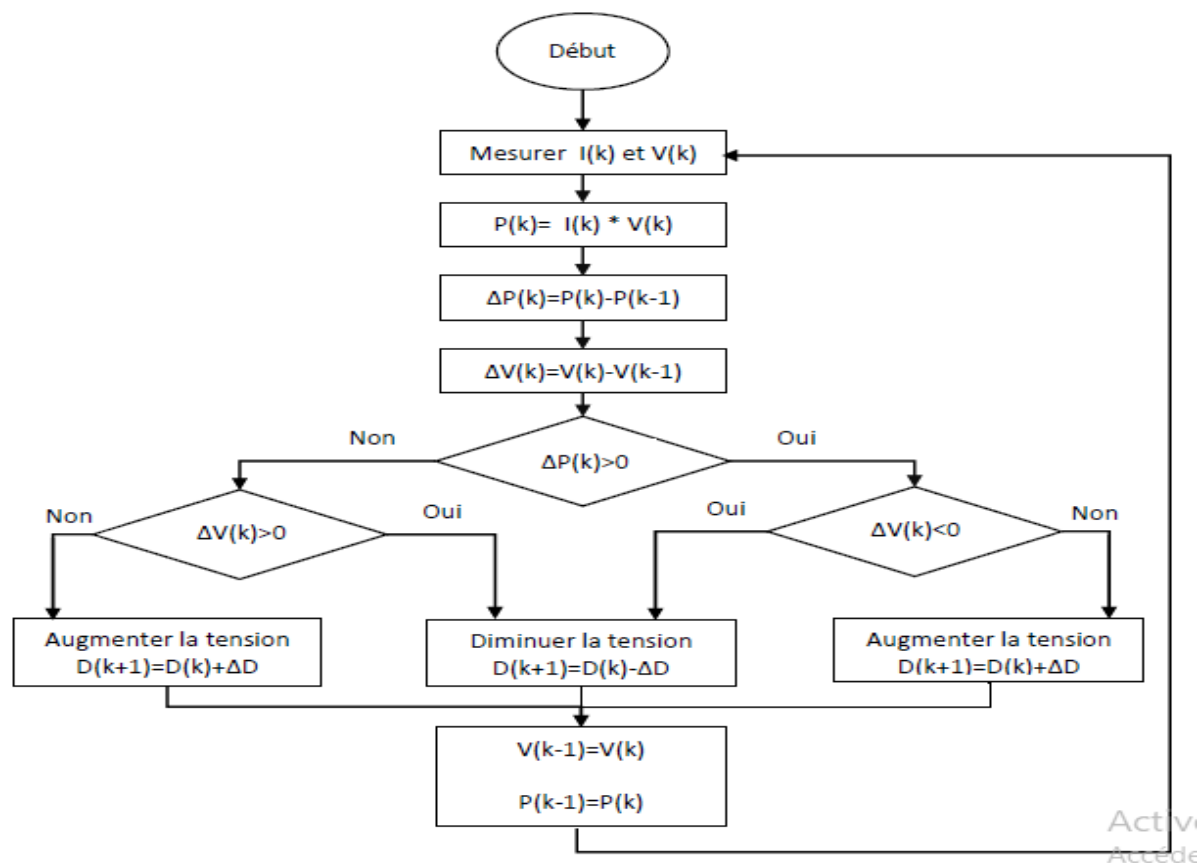


Figure II-14 Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation P&O

Sur la Figure II-15 , 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.

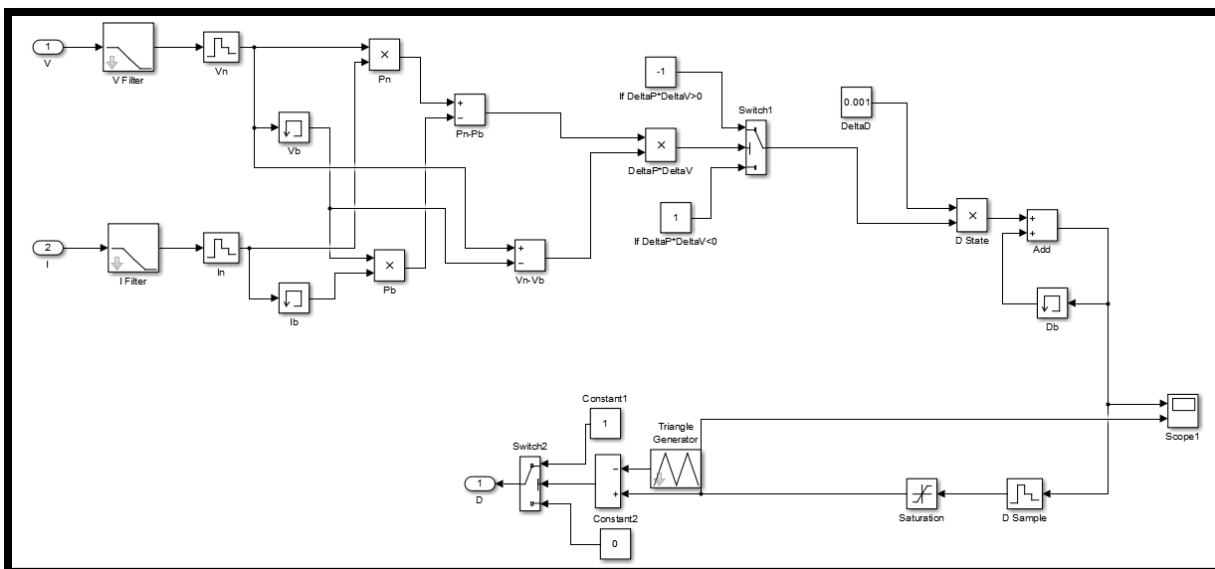


Figure II-15 Schéma de simulation de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O)

II.1.2 Convertisseur DC/AC (onduleur)

Un onduleur est un convertisseur statique utilisé pour convertir l'énergie électrique continue en une énergie alternative utilisable pour le réseau électrique. Il est généralement utilisé dans les systèmes photovoltaïques pour convertir l'énergie électrique produite par les panneaux solaires en une énergie alternative, telle que le courant alternatif, pour l'injecter dans le réseau électrique. L'onduleur permet de réguler la tension et la fréquence de sortie en fonction des besoins.

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

- **Un onduleur monophasé** convertit une tension continue en une tension alternative à une seule phase, généralement utilisée pour les petits systèmes domestiques ou commerciaux.

- Un **onduleur triphasé** convertit également une tension continue en une tension alternative, mais avec trois phases distinctes, généralement utilisé pour les systèmes

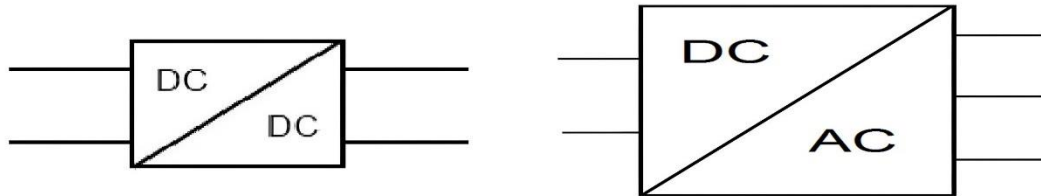


Figure II-16 symbole de de convertisseurs DC/AC monophasé et triphasé

II.1.2.1 Choix de convertisseur DC/AC

Ils existent de nombreux types de convertisseurs DC/AC sur le marché. Le choix du bon convertisseur dépend de plusieurs facteurs importants tels que la puissance de sortie requise, la tension d'entrée, le type d'onde de sortie souhaité, l'efficacité énergétique, la plage de température de fonctionnement et les options de protection.

Pour sélectionner le convertisseur DC/AC approprié, il est essentiel de déterminer la puissance de sortie requise en fonction de la tension de sortie souhaitée et du courant de charge. De plus, il faut tenir compte de la tension d'entrée de la source d'alimentation DC et choisir le type d'onde de sortie qui convient le mieux à la charge à alimenter, qu'il s'agisse d'une onde sinusoïdale, carrée...etc.

Il est également important d'évaluer l'efficacité énergétique du convertisseur DC/AC pour éviter les pertes d'énergie inutiles lors de la conversion. Si l'application exige un fonctionnement dans des environnements extrêmes, il faut s'assurer que le convertisseur peut fonctionner dans des plages de température élevées ou basses.

Enfin, il faut vérifier les options de protection du convertisseur, telles que la protection contre les surtensions, les surintensités, la surchauffe et les court-circuit.

En résumé, pour choisir le convertisseur DC/AC qui convient le mieux à vos besoins, il faut prendre en compte ces facteurs clés, consulter les spécifications techniques et comparer les différentes options disponibles sur le marché.

II.1.2.2 Les onduleurs solaires

II.1.2.2.1 Types d'onduleurs solaires

Les onduleurs utilisés pour les systèmes photovoltaïques sont similaires aux onduleurs conventionnels dans la mesure où leur fonction principale est de convertir le courant continu (DC) en courant alternatif (AC). Cependant, la principale caractéristique d'un onduleur PV est qu'il cherche à trouver le point de fonctionnement optimal pour le système. Cela s'explique par le fait que le générateur PV (composé de plusieurs modules PV) possède une courbe caractéristique non linéaire de courant en fonction de la tension ($I(V)$). En conséquence, il existe différents types d'onduleurs solaires parmi lesquelles.[23]

II.1.2.2.2 Les onduleurs Autonomes

Un onduleur autonome (illustré dans la Figure II-17) est un système qui utilise des transistors ou des thyristors pour la commutation, avec des instants de commutation déterminés par des circuits externes. Contrairement aux onduleurs classiques, il n'a pas besoin d'être connecté au réseau électrique pour fonctionner. Ces onduleurs sont disponibles en différentes tailles allant de 100W, suffisants pour alimenter un ordinateur portable, à 10KW. Ils utilisent des batteries pour stocker l'énergie et des contrôleurs de charge pour prolonger la durée de vie de ces batteries. [23-24].

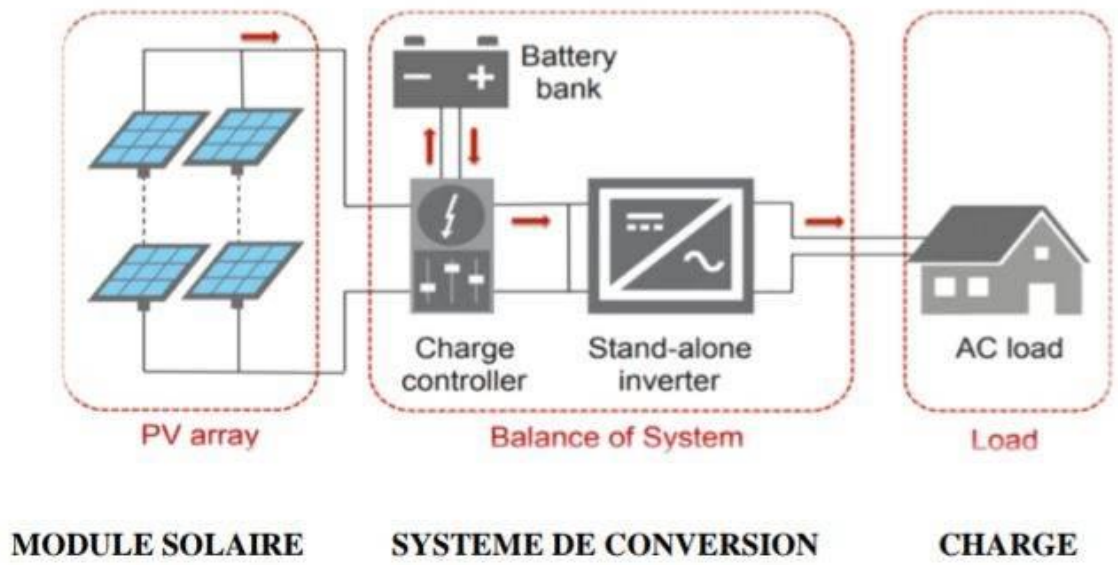


Figure II-17 Onduleurs autonomes

II.1.2.2.3 Les onduleurs interconnectés au réseau

Les onduleurs connectés au réseau sont largement utilisés dans les installations solaires de base. Ils sont des dispositifs simples à installer qui ne nécessitent que des connexions aux panneaux solaires et au réseau local. L'installation du système de raccordement au réseau est relativement rapide et facile car le système est simple. Dès que les panneaux solaires produisent du courant continu, l'onduleur connecté au réseau le détecte, bascule du mode veille au mode de fonctionnement et convertit la production d'énergie photovoltaïque en courant alternatif [23].

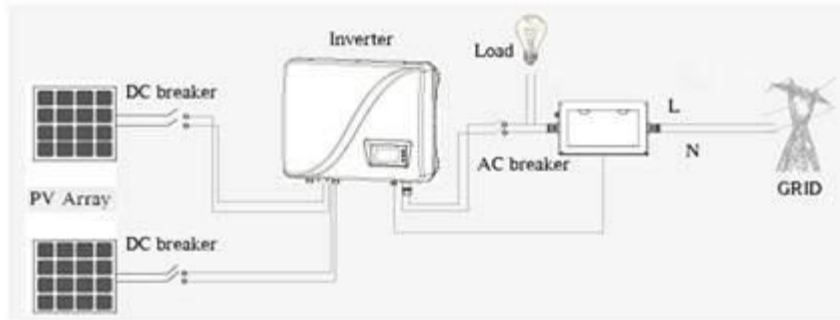


Figure II-18 Les onduleurs interconnectés au réseau

II.1.2.2.4 Les onduleurs de pompage

L'onduleur de pompage (Figure II-19) est facile à installer. Il est respectueux de l'environnement avec une longue durée de vie et des coûts de maintenance réduits. Le MPPT intégré assure d'obtenir la meilleure puissance de sortie et optimise les performances de l'onduleur solaire de la pompe à eau tout au long de la journée car il démarre et s'arrête automatiquement en fonction de l'intensité du rayonnement solaire [23].



Figure II-19 Onduleurs solaires pompage

II.1.2.3 Les structures de l'onduleurs

Les **onduleurs monophasés** convertissent le courant continu en courant alternatif pour les applications monophasées. Ils sont utilisés pour les applications domestiques et commerciales de petite taille et peuvent être connectés à des sources d'énergie renouvelable comme les panneaux solaires. Ils se composent d'un pont de diodes pour le redressement et d'un circuit d'onduleur pour la conversion en courant alternatif.

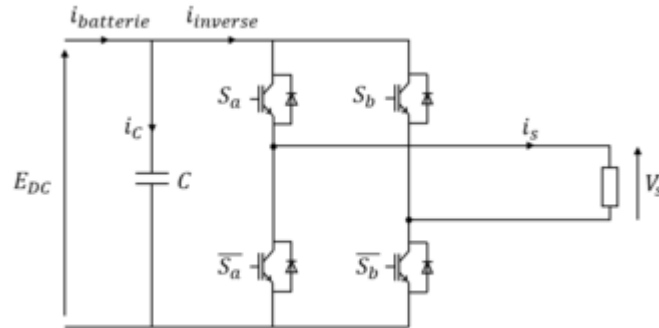


Figure II-20 Structure d'onduleur monophasé

Les **onduleurs triphasés** sont composés de trois bras, chacun avec deux interrupteurs qui doivent fonctionner de manière complémentaire pour éviter les courts-circuits. Les cellules de commutation sont composées de thyristors et de diodes ou de transistors et de diodes [9].

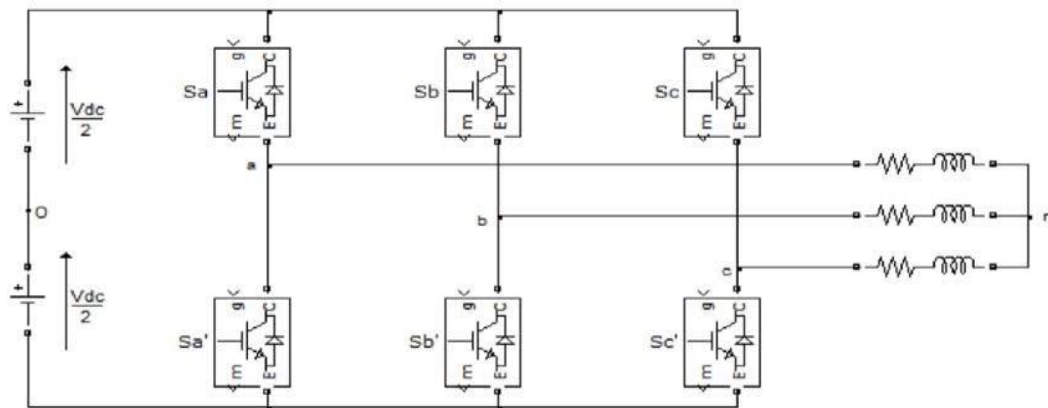


Figure II-21 Structures d'onduleurs triphasé

II.1.2.4 La Modulation de largeur d'impulsion MLI

Les différentes techniques de modulation de largeur d'impulsion utilisées pour contrôler la tension de sortie de l'onduleur et les formes d'onde du courant. Le but principal de ces techniques est d'obtenir une tension de sortie variable avec une composante fondamentale maximale et une distorsion harmonique totale minimale.

Les techniques de modulation de largeur d'impulsion ont été largement étudiées pendant de nombreuses décennies afin d'obtenir les tensions et les courants de sortie sinusoïdaux souhaités.

La modulation de largeur d'impulsion s'avère être la technique la plus appropriée pour la commande de l'onduleur tout en ayant une bonne neutralisation de l'onde de sortie [25].

II.1.2.4.1 Principe de la modulation de largeur d'impulsion.

La conversion continue alternative est assurée par les commutations des interrupteurs de l'onduleur qui vont ainsi effectuer des connexions temporaires entre les bornes de la source d'alimentation continue et les lignes de la charge triphasée alternative.

Le transfert d'énergie est contrôlé par le rapport entre intervalles d'ouverture et de fermeture (rapport cyclique) de chaque interrupteur, donc par la modulation de largeurs d'impulsions de contrôle de ces interrupteurs (MLI).

Cette technique est basée sur la comparaison d'un signal de référence appelé aussi modulatrice d'amplitude A_r et de fréquence f_r , avec un signal appelé porteuse d'amplitude A_p et de fréquence f_p très élevée [25]

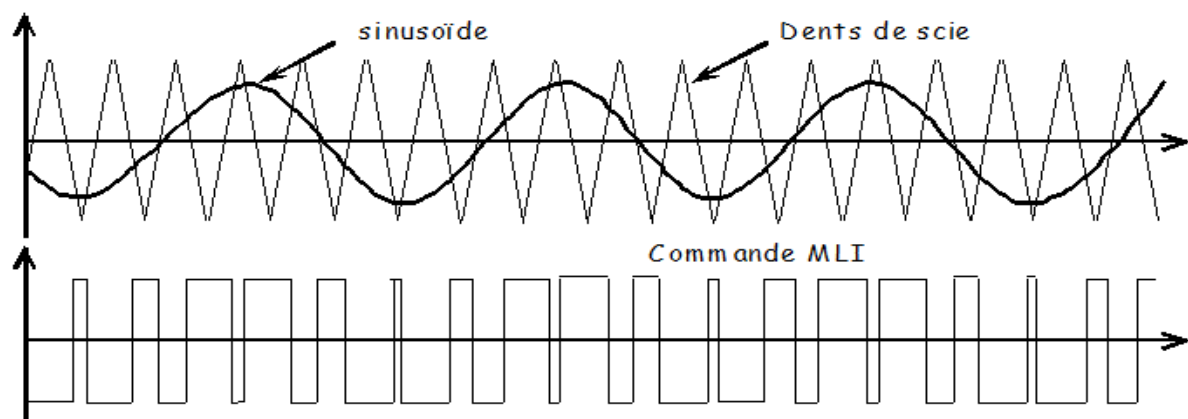


Figure II-22 MLI à porteuse en dents de scie

Tableau II-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 souhaitée, et reproduit la valeur moyenne de ce signal à chaque période de commutation en jouant sur la durée d'application des tensions positives et négatives par rapport au point milieu du bus continu	Diminue les harmoniques supplémentaires et non souhaitées présentes 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 - Modèle mathématique exigé - Non-contrôle des ondulations de courants

II.1.3 La stratégie de commande DQ

La référence dq est une approche couramment utilisée pour réguler les tensions et les courants dans les systèmes électriques. Elle permet de convertir les grandeurs triphasées en un référentiel à deux axes (d et q). En régulation de tension, elle génère une consigne de tension de référence comparée à la tension réelle pour ajuster les paramètres de régulation. De même, en régulation de courant, elle génère une consigne de courant de référence comparée au courant réel pour ajuster les paramètres. L'utilisation de la référence dq permet d'optimiser les performances, garantir la stabilité et répondre aux exigences spécifiques du système électrique.[26]

II.1.4 Régulation des courants des boucles internes

Dans le cadre de l'application de la commande MLI, un régulateur de type PI a été utilisée pour la régulation de la boucle de courant [9], qui est représenté par la Figure II-23.

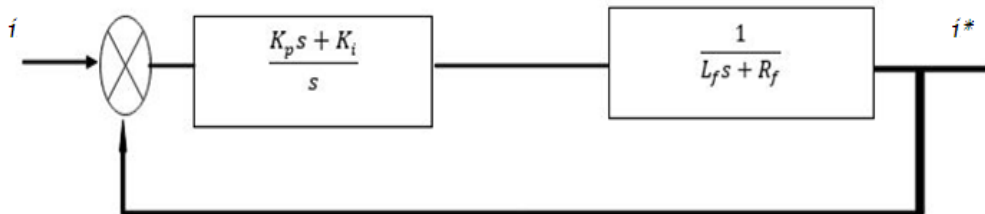


Figure II-23 Schéma de la boucle interne du courant

En boucle fermée, nous obtenons la fonction de transfert suivante :

$$\frac{i}{i^*} = \frac{k_p \left(s + \frac{k_i}{k_p} \right)}{L_f \left(s^2 + \frac{R_f + k_p}{L_f} s + \frac{k_i}{L_f} \right)} \quad (II.21)$$

Avec i et i^* représentent respectivement le courant à la sortie de l'onduleur et le courant de référence. En comparant avec la fonction de transfert standard qui est de la forme :

$$F(s) = \frac{2\xi\omega_n \cdot s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (II. 22)$$

Nous obtenons alors les paramètres du régulateur de courant égaux à :

$$k_{pc} = 2\xi\omega^2 \cdot L_f - R_f \qquad k_{ic} = L_f\omega^2 \qquad \text{avec } \xi = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

II.1.5 Boucle de régulation de tension du bus continu

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

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

En utilisant la transformée de Laplace, nous obtenons :

$$i_{dc} = C_{dc} s V_{dc}$$

Ce qui nous donne

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

Nous obtenons ainsi l'expression en boucle fermé comme suite :

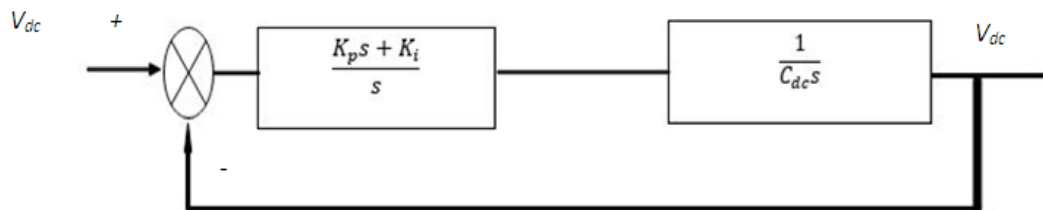


Figure II-24 Schéma de la boucle externe de la tension

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

$$Cv = \frac{U_{dc}}{V_{dc}} = k_{pv} \frac{s + \frac{k_{iv}}{k_{pv}}}{s} \quad (II.23)$$

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

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = 2\xi\omega \frac{s + \frac{\omega}{2\xi}}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} = \frac{\frac{k_{pv} \cdot s + k_{iv}}{C_{dc}}}{s^2 + \frac{k_{pv}}{C_{dc}}s + \frac{k_{iv}}{C_{dc}}} \quad (II.24)$$

Par identification, nous trouvons :

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

II.1.6 La découplage Dq pour tension et courant

Un système monophasé peut se convertir directement en une trame $\alpha\beta$ sans aucune transformation matricielle. Une variable imaginaire obtenue en décalant le signal d'origine (tension / courant) de 90 degrés et donc le signal d'origine et le signal imaginaire représentent la tension et le courant de charge dans les coordonnées $\alpha\beta$.

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{rel}(\omega t + \varphi) \\ V_{img}(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (II.25)$$

$$\begin{bmatrix} Ia \\ Ib \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{rel}(\omega t + \varphi) \\ I_{img}(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (II.26)$$

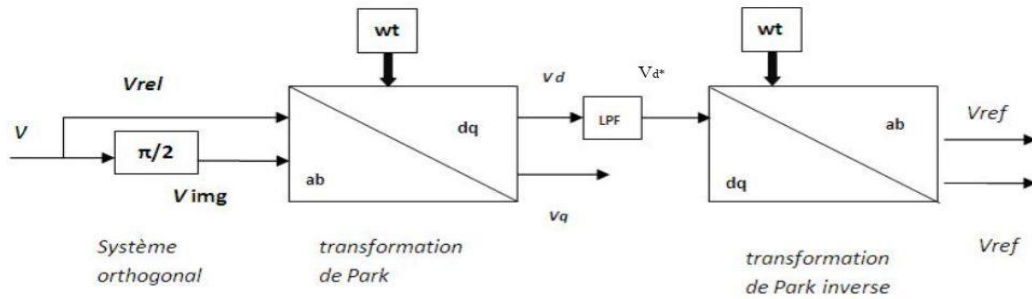


Figure II-25 La génération de signal de référence utilisant la transformation d-q

Pour obtenir

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) \\ -\cos(\omega t) & \sin(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{rel} \\ V_{img} \end{bmatrix} \quad (II.27)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) \\ -\cos(\omega t) & \sin(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{rel} \\ I_{img} \end{bmatrix} \quad (II.28)$$

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

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d^* + 0 \\ 0 + 0 \end{bmatrix} \quad (II.29)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ref} \\ V_{refimg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) \\ -\cos(\omega t) & \sin(\omega t) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (II.30)$$

Afin d'après la régulation de l courant et obtenir V_{dref} , le terme V_{dref} est ajouté à l'équation ci-dessus.

$$\begin{bmatrix} V_{ref} \\ V_{refimg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) \\ -\cos(\omega t) & \sin(\omega t) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_d^* + V_{dref} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (II.31)$$

donc le signal de référence est

$$V_{ref}(\omega t) = \sin(\omega t)(V_d^* + V_{dc}) \quad (II.32)$$

Le tension de référence généré est utilisé pour devenir le référence de la commande MLI.

Conclusion

Ce chapitre présente une vue d'ensemble des convertisseurs statiques, notamment les convertisseurs DC/DC et DC/AC, ainsi que leur commande. Il aborde également la commande MPPT, les techniques P&O, la régulation des courants et des tensions, l'utilisation des régulateurs PI et la référence dq. Grâce à ces informations, on peut acquérir une compréhension des principes fondamentaux de ces convertisseurs et des mécanismes de contrôle essentiels pour assurer leur bon fonctionnement. Ce chapitre couvre divers types de convertisseurs statiques, notamment ceux utilisés pour modifier les tensions continues et alternatives. La commande MPPT est expliquée en détail, offrant une méthode efficace pour optimiser la puissance extraite des panneaux solaires. Les techniques P&O sont également abordées, fournissant une approche courante pour atteindre le point de puissance maximale. De plus, la régulation précise des courants et des tensions est essentielle pour garantir la stabilité et les performances des convertisseurs. Les régulateurs PI sont introduits en tant que méthode couramment utilisée pour maintenir les grandeurs électriques dans les limites spécifiées. Enfin, la référence dq est expliquée, décrivant comment les grandeurs électriques sont transformées pour faciliter le contrôle dans les systèmes triphasés. Dans l'ensemble, ce chapitre fournit une base solide pour comprendre les convertisseurs statiques et les mécanismes de contrôle qui les accompagnent.

Chapitre III

Simulation et

évaluation des

résultats.

III.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, une vue d'ensemble des convertisseurs statiques, notamment les convertisseurs DC/DC et DC/AC, ainsi que leur commande, a été présentée. L'accent a été mis sur des concepts clés tels que la commande MPPT, les techniques P&O, la régulation des courants et des tensions, l'utilisation des régulateurs PI et la référence dq. L'objectif de ces composants est de maximiser la production d'électricité, de convertir le courant continu en courant alternatif et de garantir une alimentation électrique de qualité. Des simulations ont été réalisées pour optimiser les performances globales du système.

III.2 Description du système photovoltaïque global :

La figure III.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, l'hacheur, l'onduleur et le filtre LC. Ces éléments interagissent pour assurer la conversion efficace de l'énergie solaire en électricité utilisable et garantir le bon fonctionnement du système.

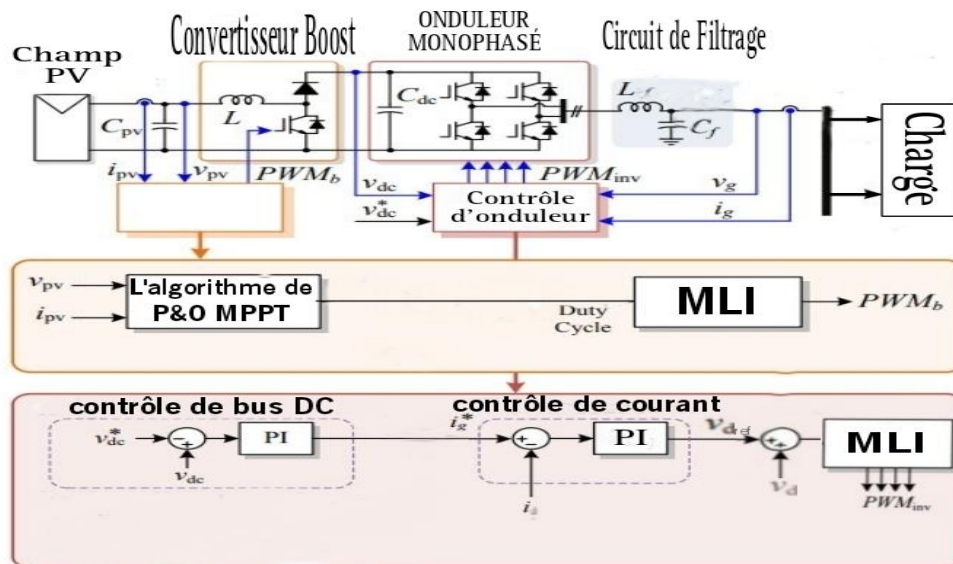


Figure III-1 Schéma synoptique de installation off-grid (autonomie au fil de soleil)

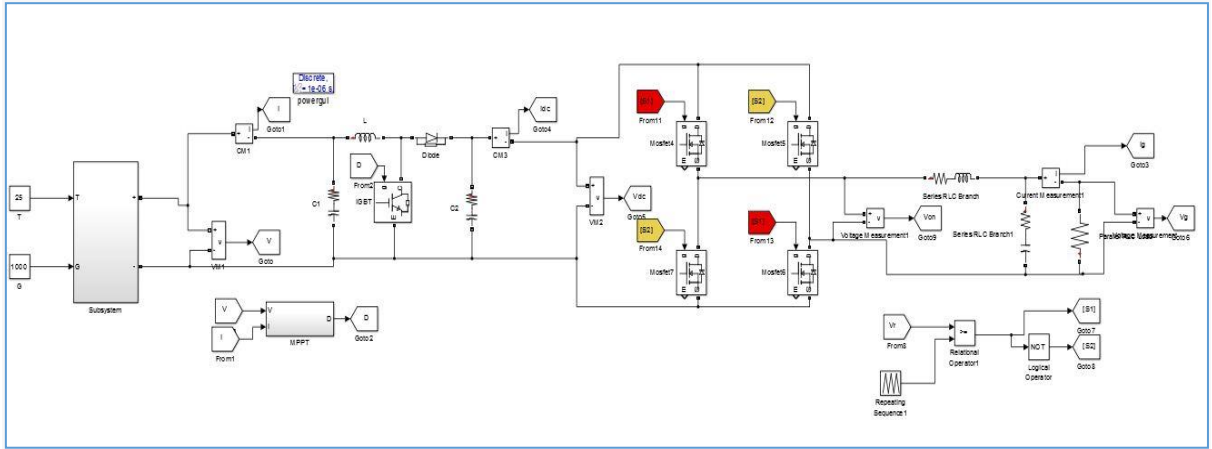


Figure III-2 Schéma de la simulation du système photovoltaïque

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

III.2.1 Le panneau photovoltaïque:

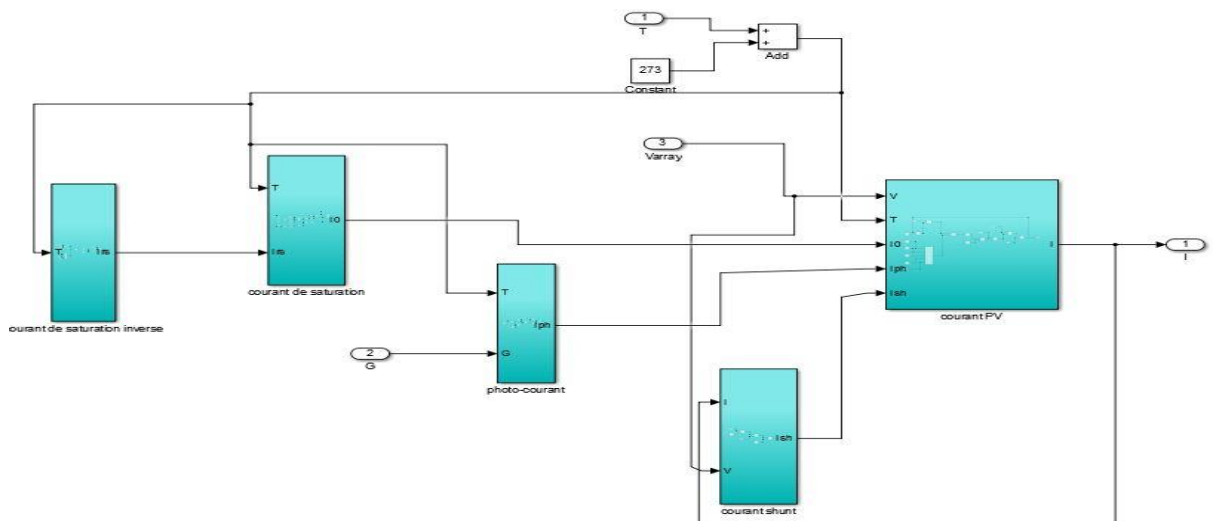


Figure III-3 Modèle 'SIMULINK' du panneau photovoltaïque 200w.

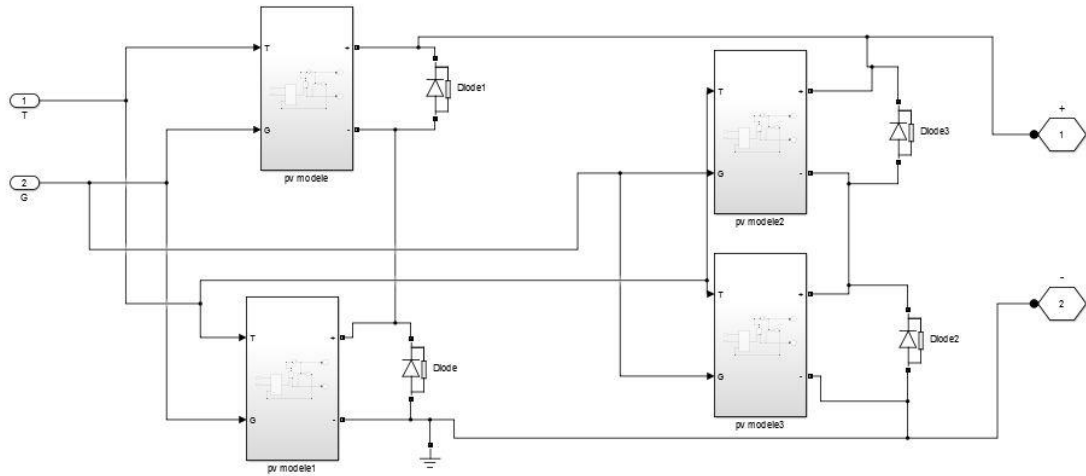


Figure III-4 Modèle 'SIMULINK' du champ photovoltaïque 800w.

III.2.1.1 Les caractéristiques électriques du panneau PV :

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

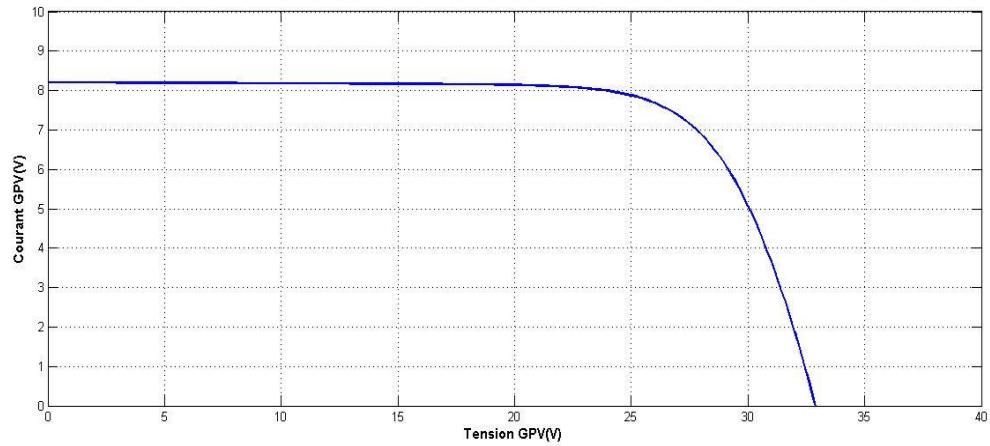
Les courbes caractéristiques d'un panneau solaire photovoltaïque (PV) représentent comment le courant et la puissance produits par le panneau varient en fonction de la tension appliquée. Elles permettent de voir comment le courant évolue en fonction de la tension, du court-circuit (tension nulle, courant 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 maximal de 200.143w est considéré dans les conditions standards $G=1000w/m^2$, $T=25^{\circ}C$. Pour réaliser la modélisation de ce module, nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation.

Tableau III-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



FigureIII-5 Caractéristiques $I = f(V)$ du panneau PV
(température=25°C,insolation=1000w/m²)

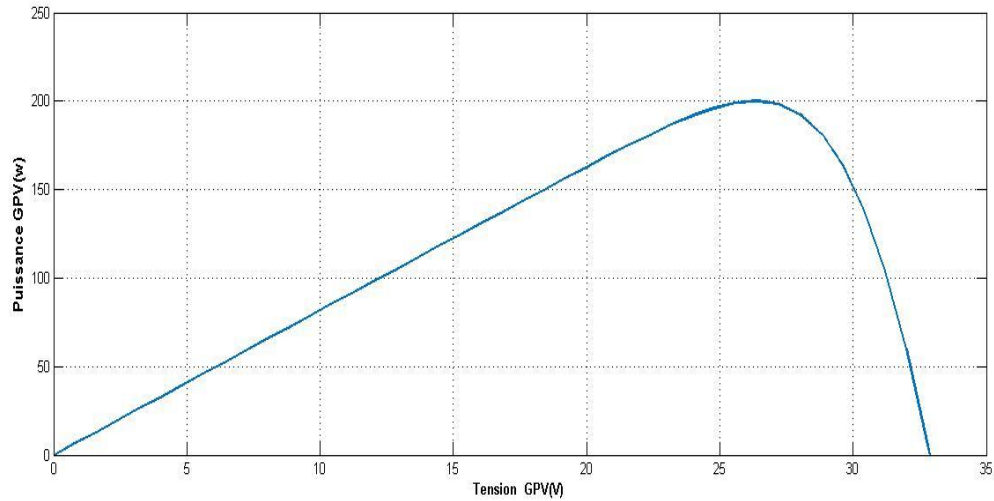


Figure III-6 ::Caractéristiques $P = f(V)$ du panneau PV
(Température=25°C,insolation=1000W/m²)

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 a : 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 a : 8.21A

Il est directement proportionnel à l'éclairement G (W / m²), 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 III-4)

III.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/m². L'intérêt majeur sera focalisé sur les ondulations au niveau de la puissance et de la tension.

III.2.1.3 Résultats de la simulation a la sortie du GPV :

III.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 III-7) représente la caractéristique courant-tension d'un panneau PV solaire en fonction de l'éclairement, à une température constante de 25°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 III-8). Donc la puissance augmente aussi (Figure III-8).

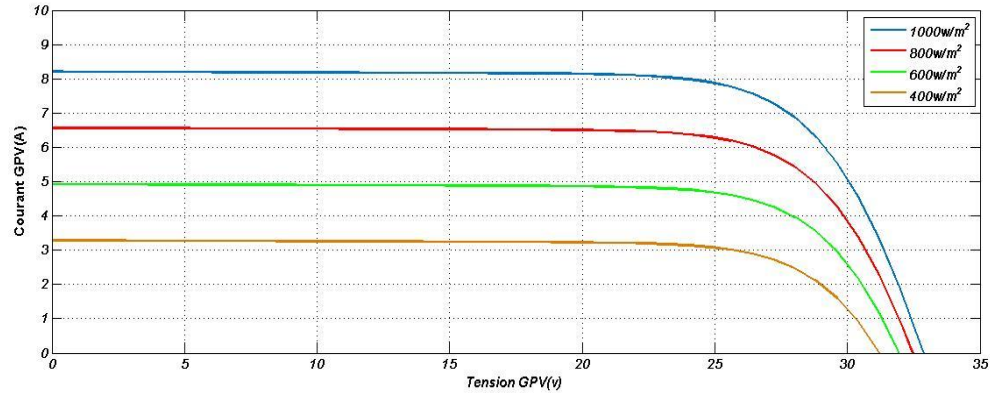


Figure III-7 Caractéristiques Courant-Tension pour différents éclairements

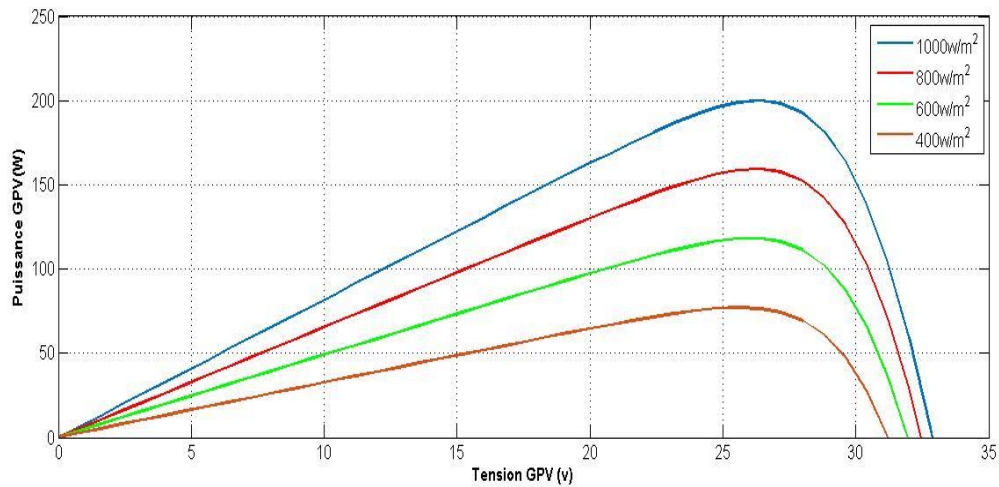


Figure III-8 Caractéristiques Puissance Tension pour différents éclaircissements

III.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 :

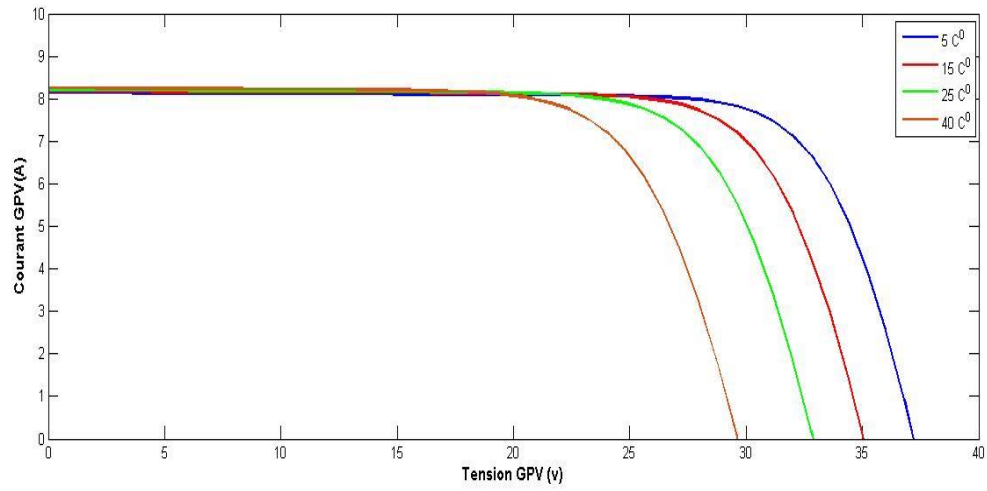


Figure III-9 Caractéristiques Courant-Tension pour différentes températures

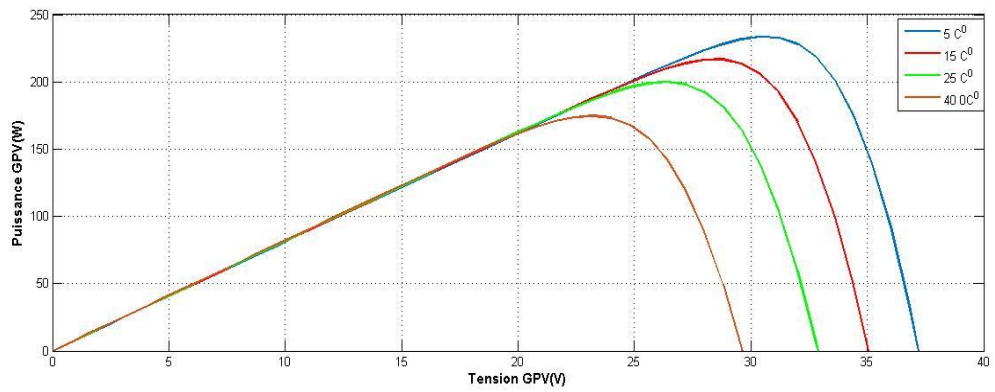


Figure III-10 Caractéristiques Puissance–Tension pour différentes températures

III.2.3 Onduleur monophasé :

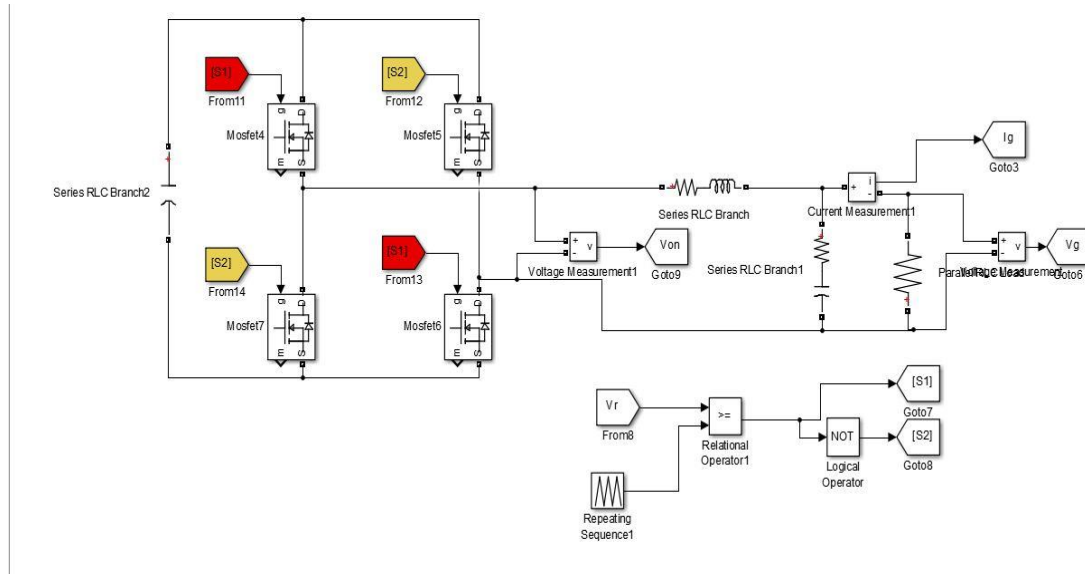


Figure III-12 modèle 'MATLAB SIMULINK' onduleur monophasé

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 III-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 LC pour filtrer les harmoniques et garder la fréquence à 50Hz.

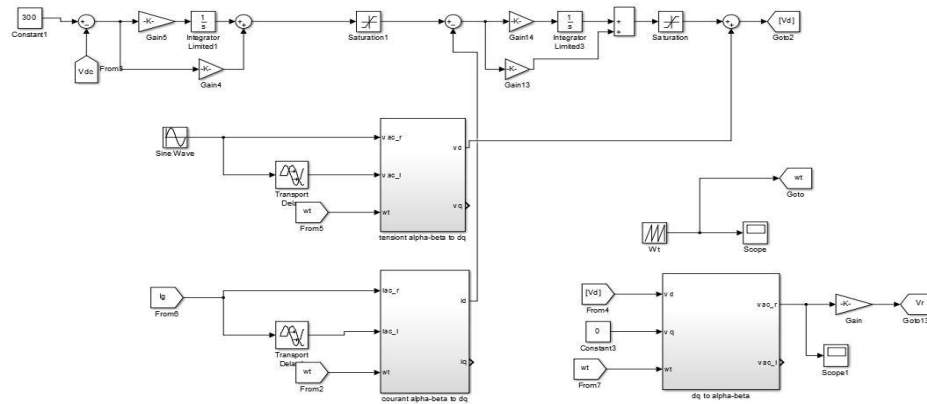


Figure III-13 modèle 'MATLAB SIMULINK' de la commande d'onduleur

Tableau III-3 les paramètres de filtre LC

Inductance (L)	Capacité(C)
4.06Mh	6.27 μ F

III.3 Etude et dimensionnement de notre projet:

Notre travail consiste à étudier et simuler, à l'aide de MATLAB, un bureau-type à l'Université de Laghouat qui utilise des panneaux solaires d'une capacité de 800 W. L'objectif est d'introduire les énergies renouvelables dans le quotidien des étudiants et de réduire les coûts des factures d'électricité pour l'université, le tableau suivant représente la consommation journalière de les équipements de cette bureau-type.

Tableau III-4 Représentation de consommation journalière des charges

Charge	Quantité	Puissance (W)	Utilisation (j)	Consommation (Wh/j)
Ordinateur	2	400	6	2400
Chargeur de PC	1	64	1	64
Chargeur de MOBILE	1	50	1	50
Ventilateur	1	50	5	250
Router	1	12	7	84
imprimante	1	40	1	40
Total		616		2888

D'après le tableau (illustré dans Tableau III 1) on a la consommation journalière de cette installation est de 2888 (wh/j)

On va calculer la puissance crête de notre champ PV :

$$P_c = \frac{C_j}{H_i * \eta_{dc} * \eta_{gen} * \eta_{ond}}$$

H_i (hs/j) ou (kWh/m²/j) : Rayonnement moyen journalier du mois sur le plan des panneaux solaires (plan incliné).

η_{gen} (%) : Rendement du générateur photovoltaïque (Pertes dues à la poussière, à l'échauffement des modules, au câblage, etc.). Valeur typique 80%.

η_{dc} (%) : Rendement de la hacheur .

η_{ac} (%) :le rendement de l'onduleur.

Application numérique :

$$P_c = \frac{2888}{6 * 0.9 * 0.8 * 0.84}$$

$$P_c = 796 \text{ wc}$$

On va calculer nombre de modules en série :

$$N_{MS} = \frac{V_{gen}}{V_m} = \frac{65.8}{32.9} = 2$$

Après nous calculons le nombre de modules en parallèle :

$$N_{Mp} = \frac{P_c}{P_m * N_{MS}} = \frac{796}{200 * 2} = 1.96 \approx 2$$

Donc le nombre total des panneaux est :

$$N_t = N_{Mp} * N_{MS} = 2 * 2 = 4$$

V_{gen} :Tension qui généré par le champ PV.

V_m :Tension de module panneaux.

P_m :Puissance de module panneaux.

III.4 Fonctionnement dans des conditions environnementales standard STC:

III.4.1.1.1 Résultats de simulation à la sortie du GPV et convertisseur DC/DC :

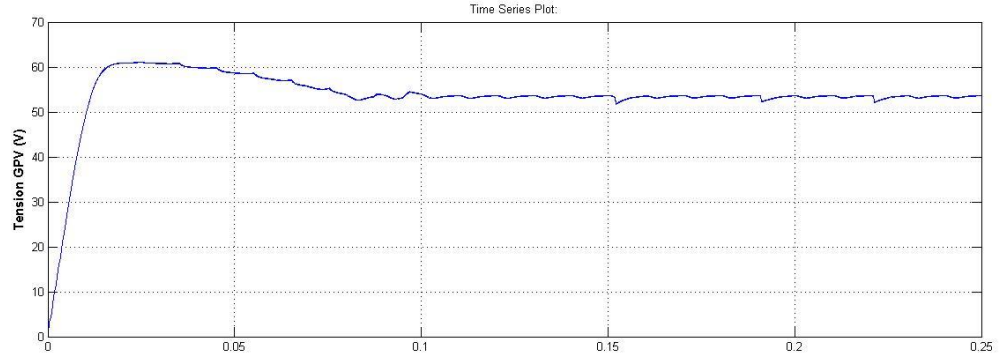


Figure III-14 Tension de sortie du GPV dans STC

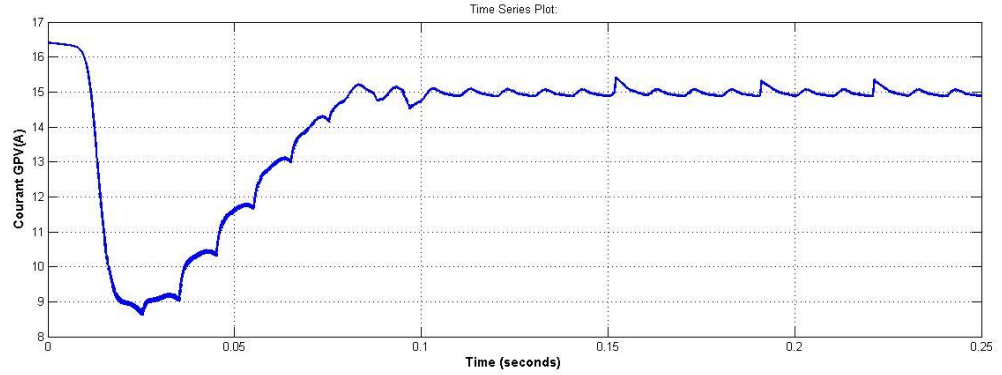


Figure III-15 courant de sortie du GPV dans STC

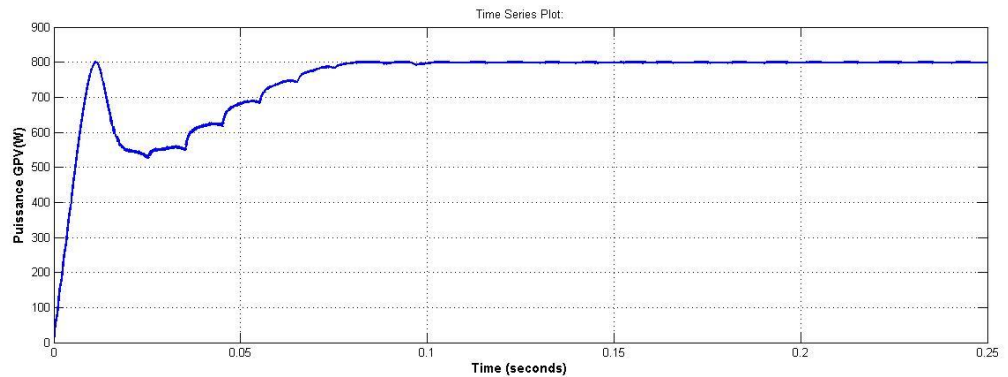


Figure III-16 puissance de sortie du GPV dans STC

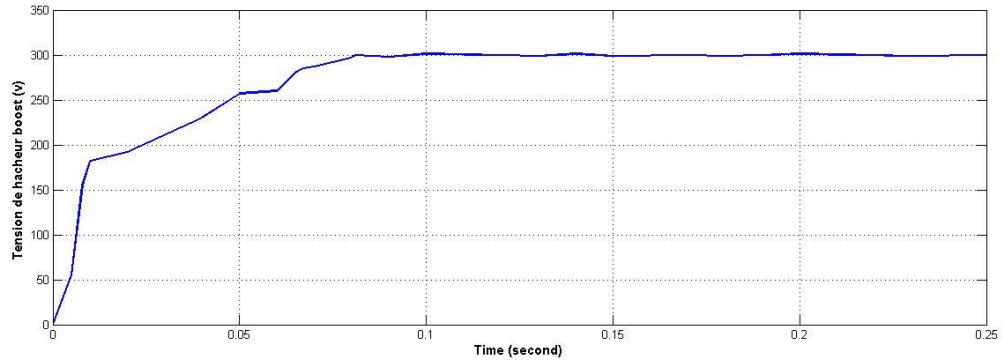


Figure III-17 Tension de sortie du hacheur boost dans STC

Interprétation des résultats :

Les résultats de simulation indiquent que les grandeurs électriques à la sortie du panneau solaire et du hacheur élévateur contrôlé par la commande MPPT se stabilisent autour des valeurs cibles. Après une brève période de transition de 0,08 seconde, la commande MPPT maintient le point de fonctionnement près du point du maximum de puissance (PPM) en oscillant légèrement. La puissance fournie par le panneau solaire se stabilise à environ 800 W, tandis que la puissance fournie à la charge atteint environ 730,9 W. La tension à la sortie du panneau se stabilise autour de 54,6 V, tandis que la tension de sortie du hacheur se stabilise autour de 300 V au niveau de la charge. Il est important de noter que la différence de puissance entre la sortie du panneau et la puissance fournie à la charge reste inférieure à 69,1 W. 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.

III.4.1.1.2 Résultats de simulation à la sortie du convertisseur DC/AC :

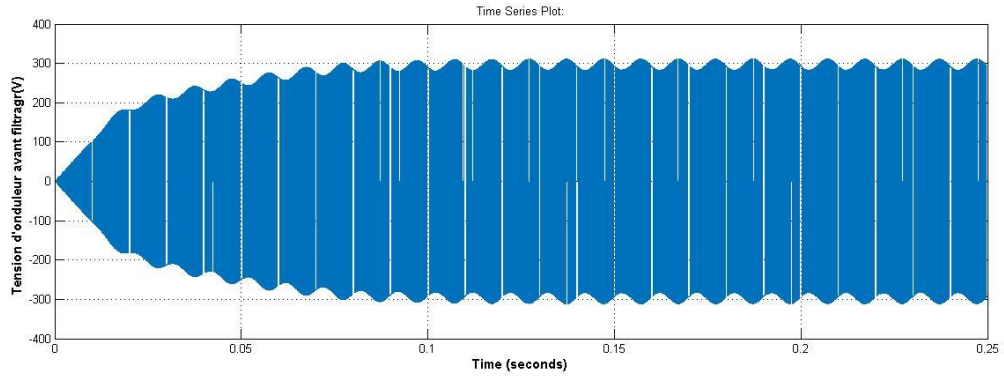


Figure III-18 Tension de sortie d'onduleur avant filtrage dans STC

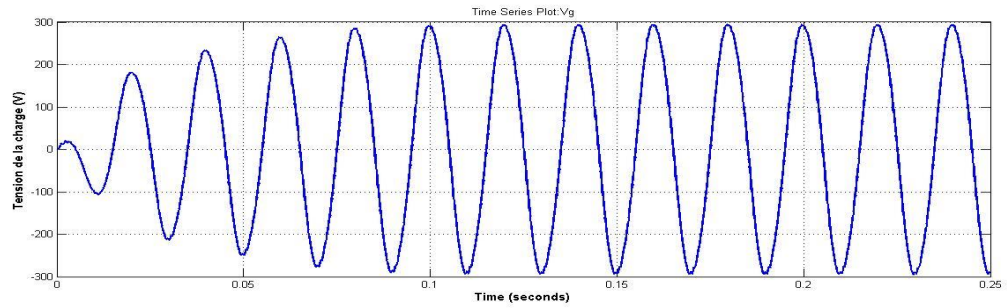


Figure III-19 Tension de sortie de la charge dans STC

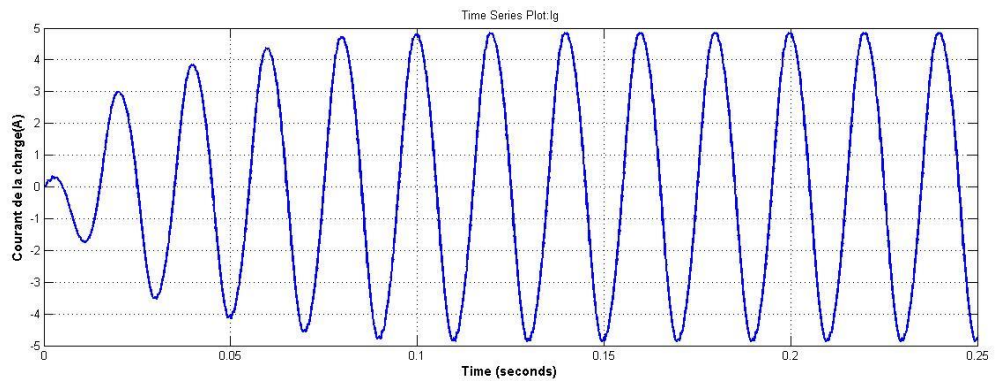


Figure III-20 Courant de sortie de la charge dans STC

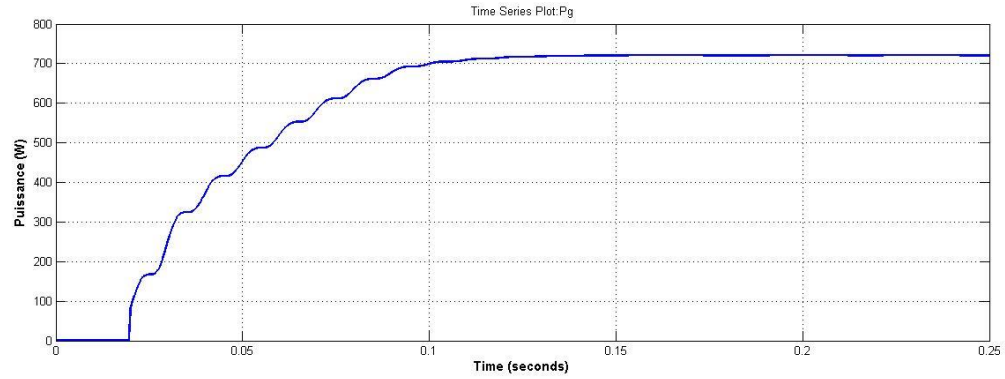


Figure III-21 Puissance de sortie de la charge dans STC

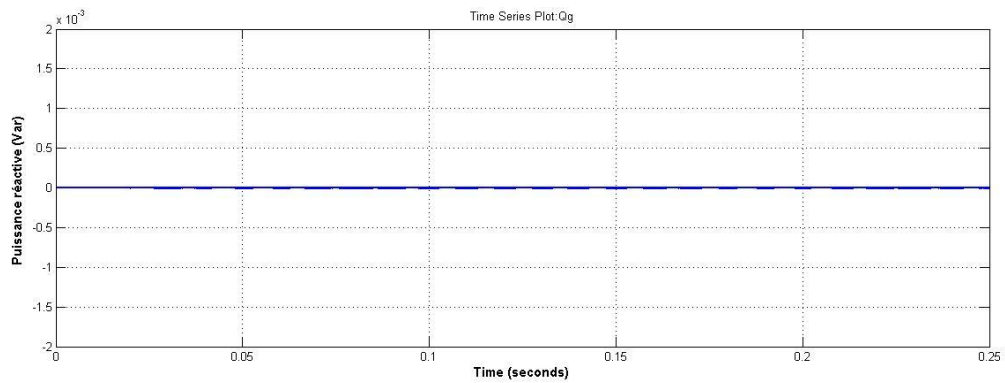


Figure III-22 la puissance réactive dans STC

Interprétation des résultats :

Nous observons que l'onduleur se caractérise par sa capacité à maintenir une tension à valeur efficace de 215 V et courant de sortie stable et sinusoïdale, à assurer un rendement élevé de conversion de l'énergie solaire et à réduire au minimum les pertes d'énergie.

III.5 Fonctionnement dans des conditions environnementales variables :

III.5.1 Eclairage variable et température constante :

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

III.5.1.1 Profil lent :

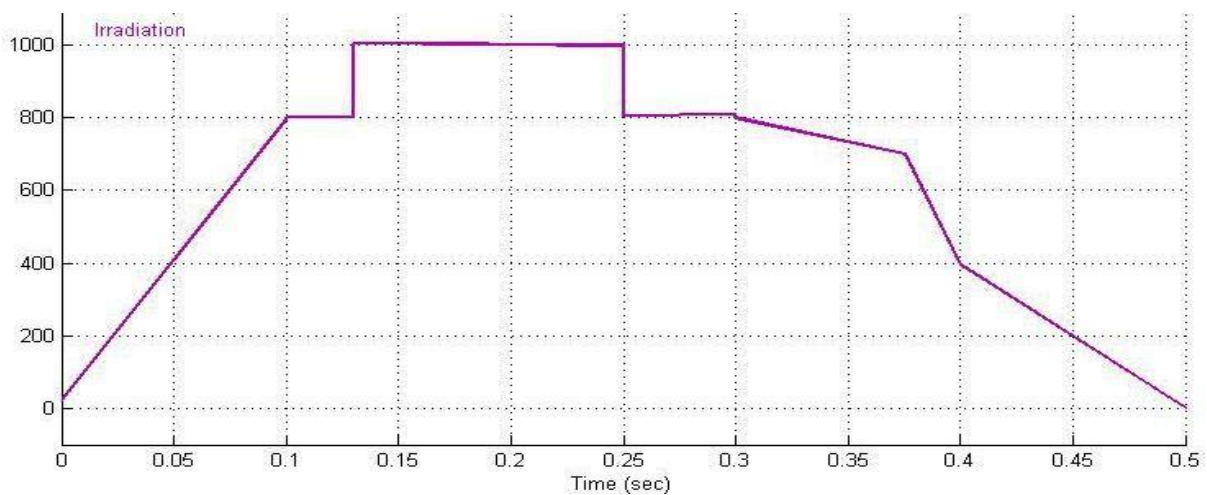


Figure III-23 Variation de l'éclairage en fonction du temps (profil lent).

III.5.1.1.1 Résultats de simulation à la sortie du GPV et convertisseur DC/DC :

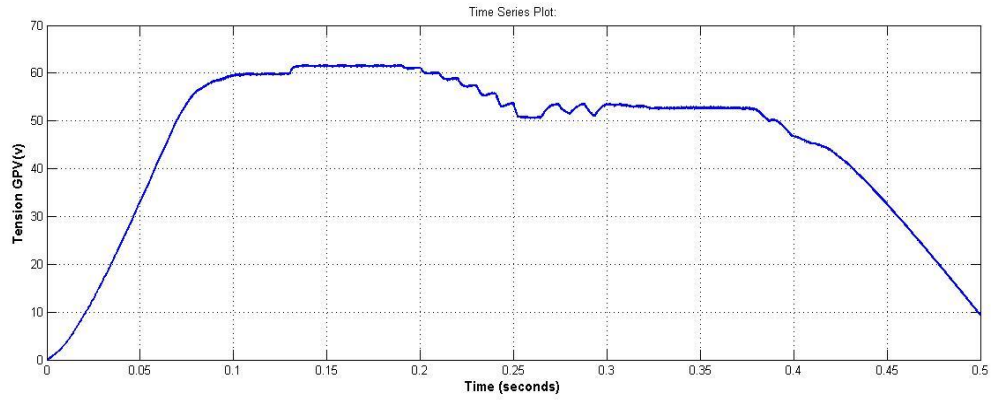


Figure III-24 Tension de sortie du GPV pour un éclairement variable (profile lent)

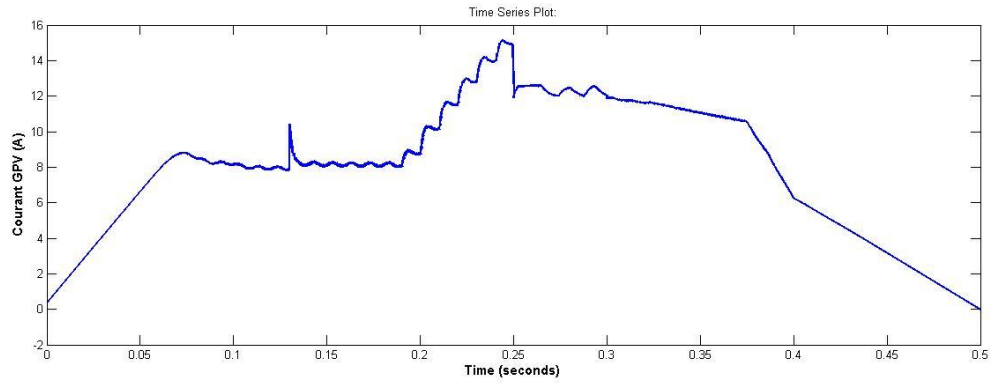


Figure III-25 Courant de sortie du GPV pour un éclairement variable (profile lent).

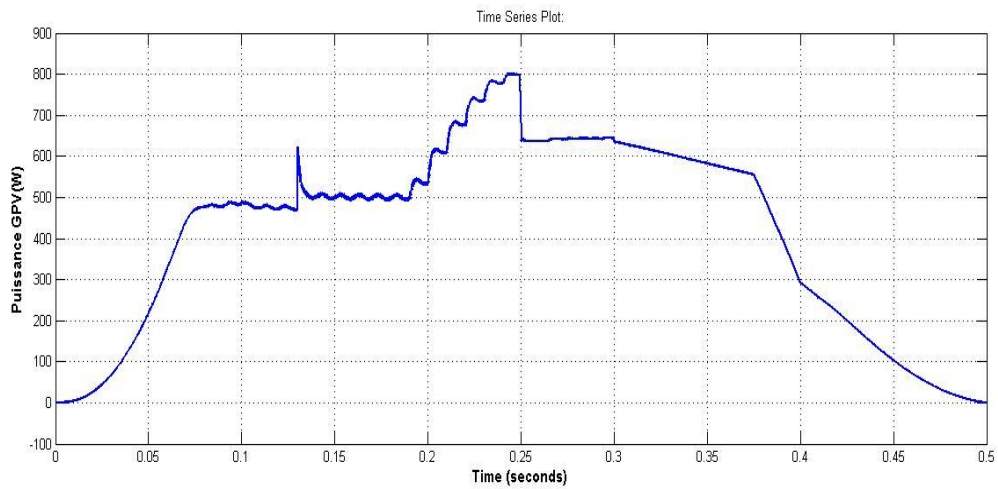


Figure III-26 puissance de sortie du GPV pour un éclairement variable (profile lent).

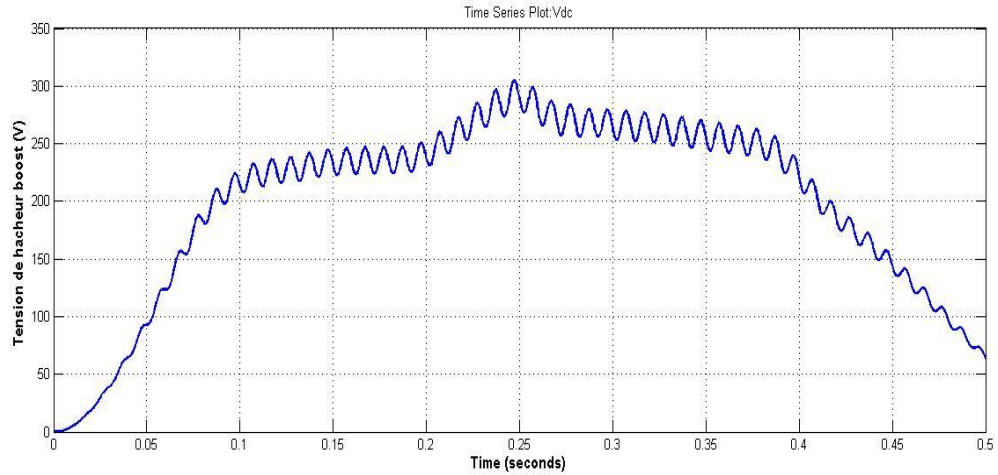


Figure III-27 Tension de sortie du convertisseur boost pour un éclairage variable (profile lent)

III.5.1.1.2 Résultats de simulation à la sortie du convertisseur DC/AC :

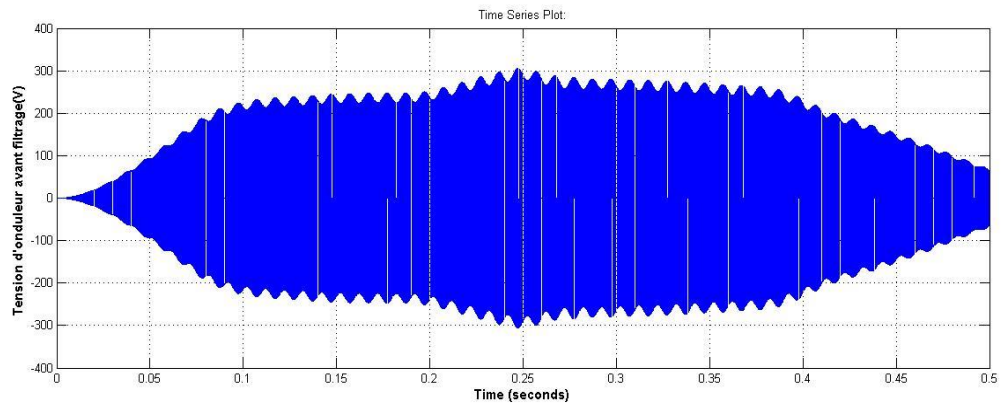


Figure III-28 Tension de sortie du convertisseur DC/AC pour un éclairage variable (profile lent)

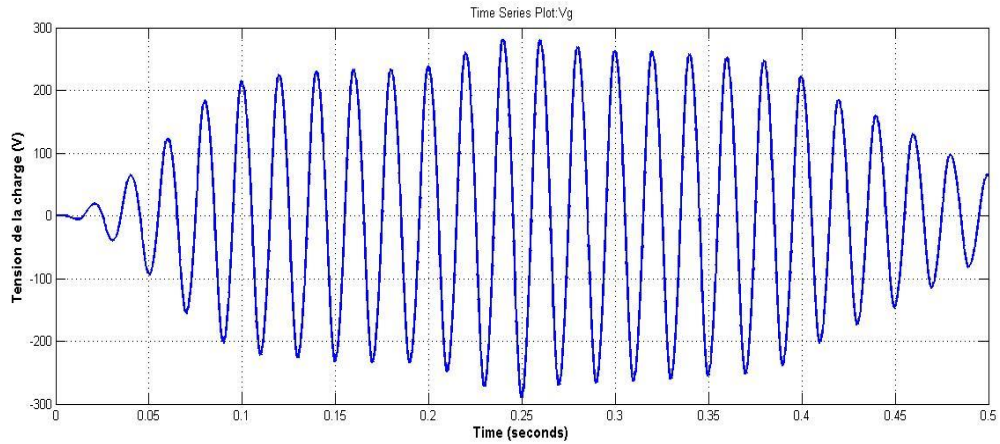


Figure III-29 Tension de sortie de la charge pour un éclairement variable (profile lent)

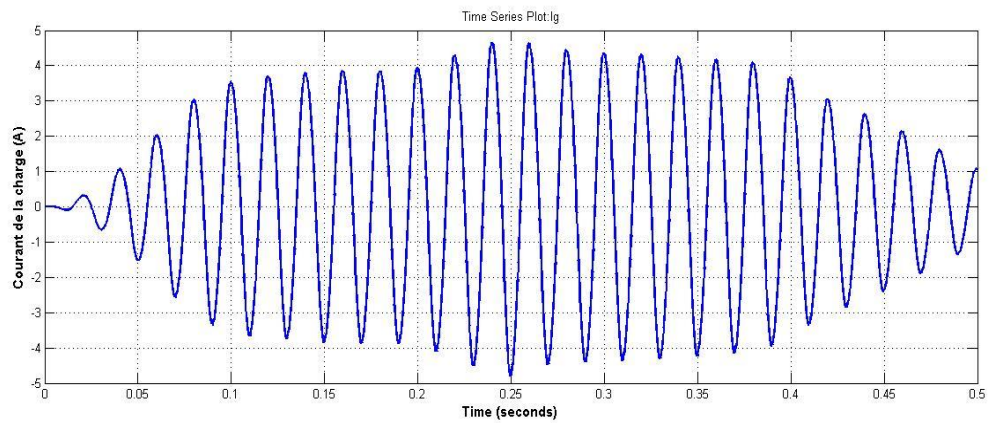


Figure III-30 Courant de sortie de la charge pour un éclairement variable (profile lent)

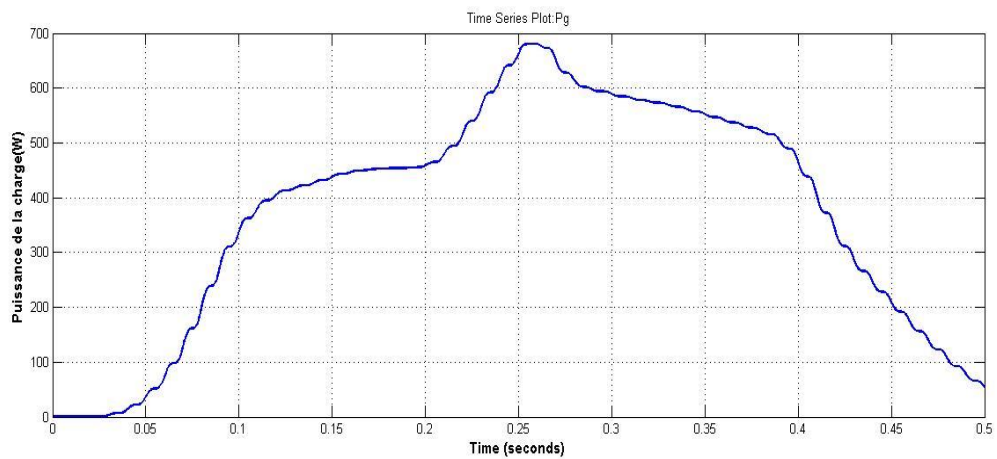


Figure III-31 Puissance de sortie de la charge pour un éclairement variable (profile lent)

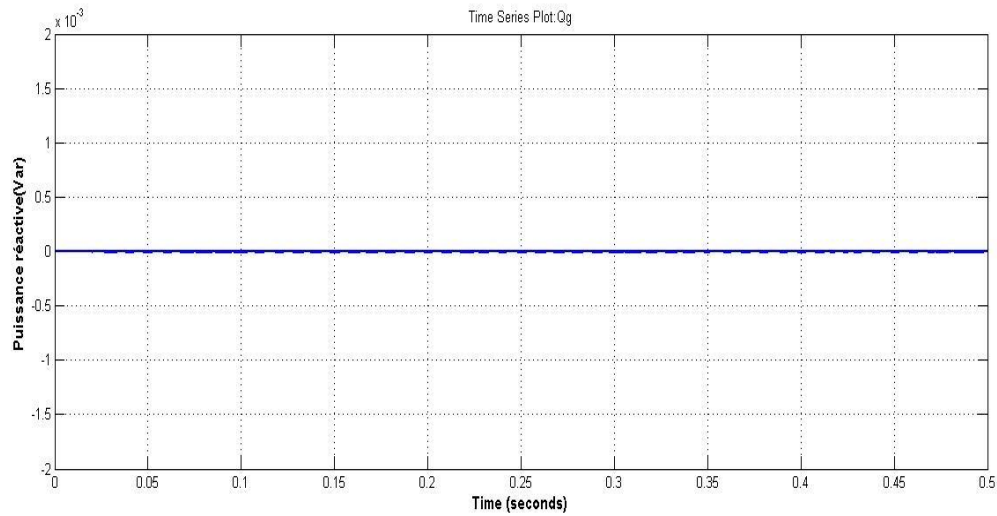


Figure III-32 Puissance réactive pour un éclairement variable (profile lent)

Interprétation des résultats :

dans un système PV avec une température constante mais un éclairement solaire variable de 0 à 800 W/m^2 , suivi d'une stabilisation à 800 W/m^2 , puis d'une augmentation à 1000 W/m^2 et enfin d'une diminution à 0, 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.

III.5.2 Eclairage constant et température variable :

Pour présenter l'effet de la température T sur la tension, on fait maintenir l'éclairage à une valeur constante $G= 1000 \text{ w/m}^2$ et on fait varier la température de $(10, 45) ^\circ\text{C}$ pour deux profils différents.

III.5.2.1 Profil lent :

Pour un éclairage interne fixé à 1000W/m^2 , on simule une augmentation de l'éclairage de 10°C à 45°C . On refait l'expérience, dans l'autre sens, en diminuant la température de 45°C à 10°C durant le même laps de temps.

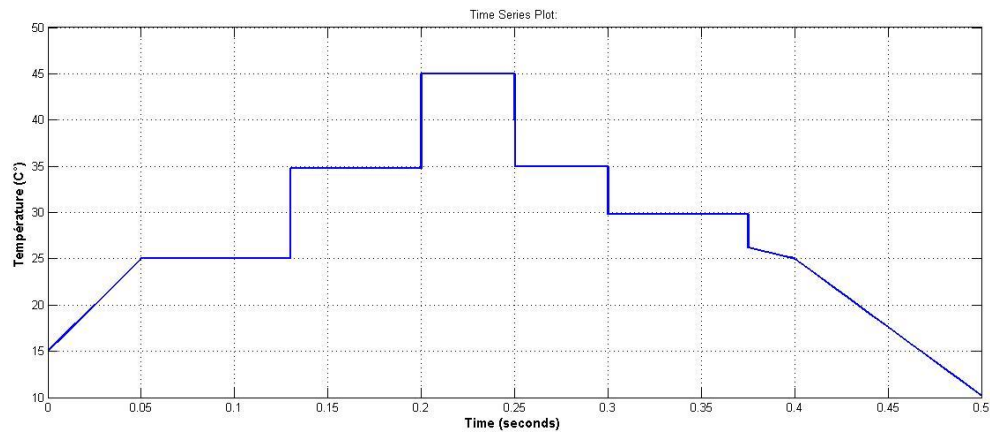


Figure III-33 Variation de température en fonction du temps (profil lent).

III.5.2.2 Résultats de simulation à la sortie du GPV et convertisseur DC/DC :

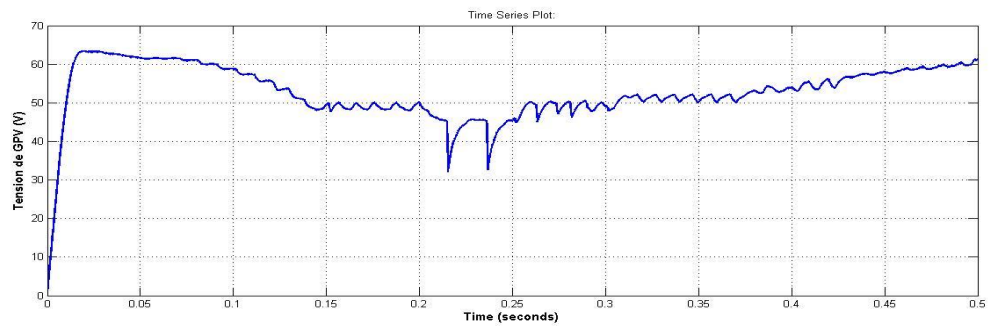


Figure III-34 Tension de sortie du GPV pour un température variable (profile lent)

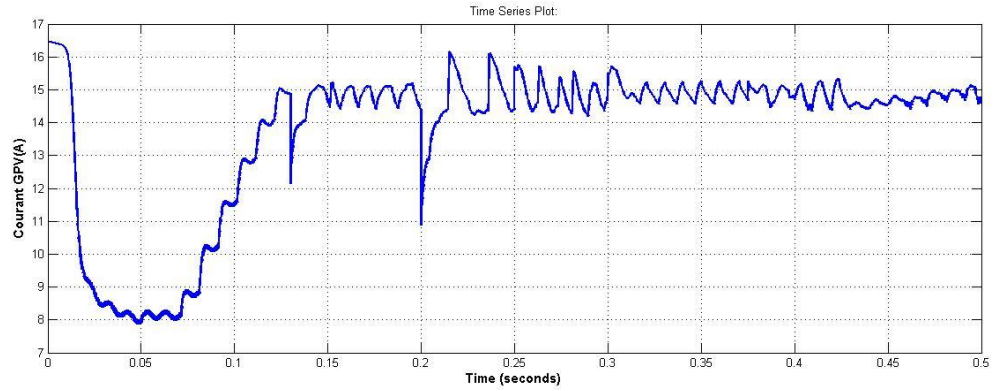


Figure III-35 Courant de sortie du GPV pour un température variable (profile lent)

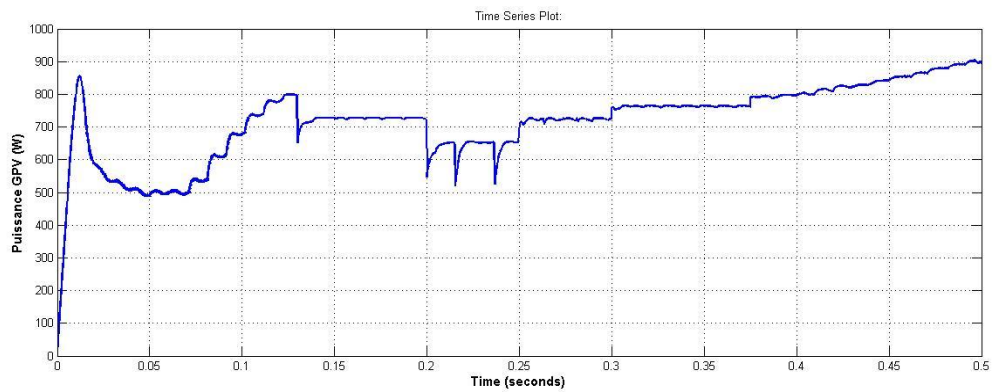


Figure III-36 Puissance de sortie du GPV pour un température variable (profile lent)

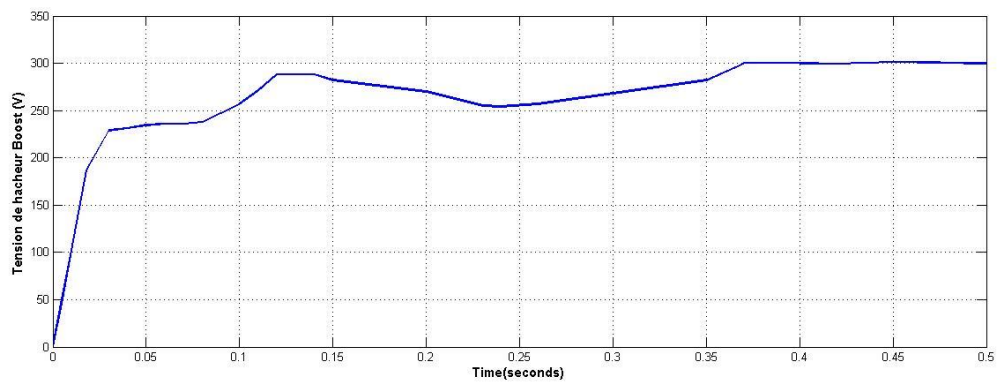


Figure III-37 Tension de sortie de hacheurboost pour un température variable (profile lent)

III.5.2.2.1 Résultats de simulation à la sortie du convertisseur DC/AC :

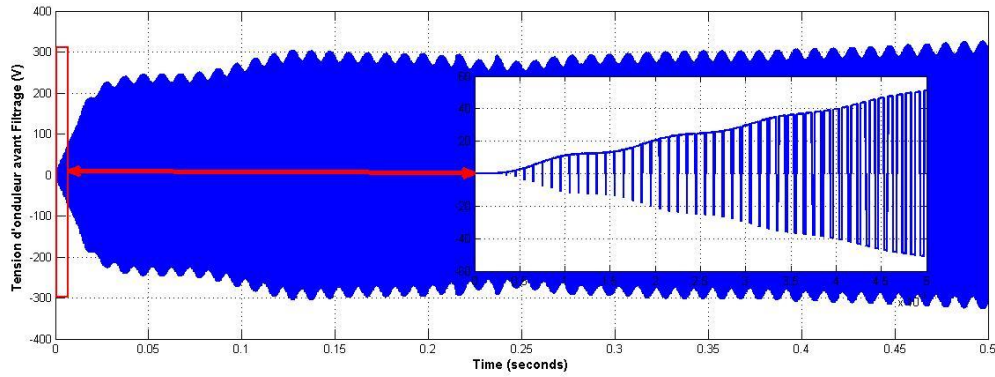


Figure III-38 Tension de sortie du convertisseur DC/AC pour un température variable (profile lent)

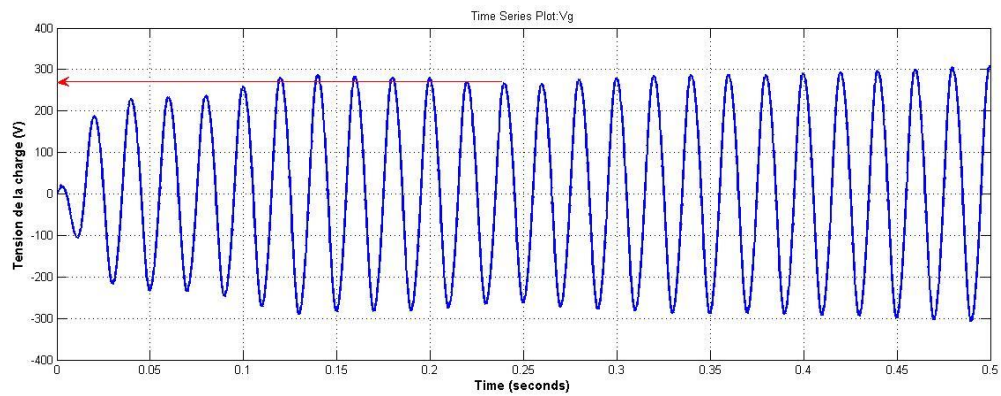


Figure III-39 Tension de sortie de la charge pour un température variable (profile lent)

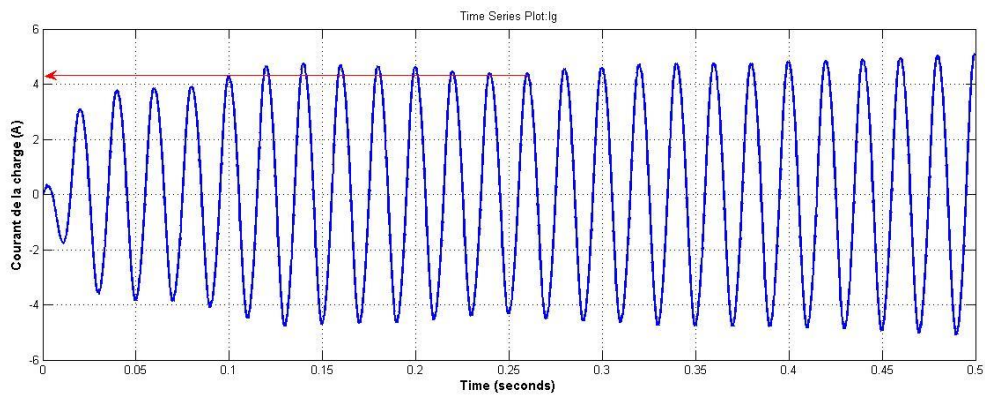


Figure III-40 Courant de sortie de la charge pour un température variable (profile lent)

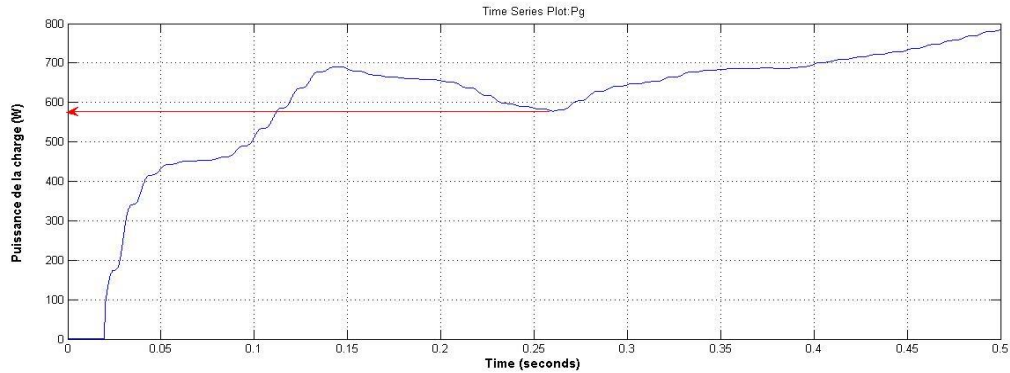


Figure III-41 Puissance du sortie de la charge pour un température variable (profile lent)

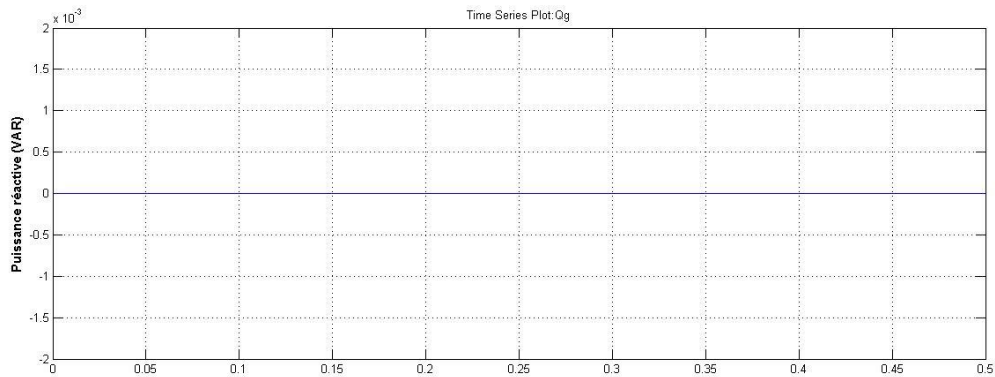


Figure III-42 Puissance réactive pour un température variable (profile lent)

Interprétation des résultats :

dans un système PV avec un éclairage solaire constant et une température variant de 15°C à 45°C, puis diminuant à 10°C, on peut s'attendre à une diminution de la tension de sortie lorsque la température augmente et à une stabilisation ou légère augmentation lorsque la température diminue. Le courant de sortie peut augmenter légèrement ou rester relativement stable avec une augmentation de la température, et se stabiliser ou diminuer légèrement avec une diminution de la température. Ces variations sont principalement dues à l'effet de la température sur les caractéristiques des panneaux solaires.

III.6 Etude et simulation d'une charge inductive :

Sur la fiche signalétique d'un moteur fonctionnant sur le secteur monophasé 230v, on lit les caractéristiques suivantes : 50Hz, 230v, P=600W, S=704VA, 2850tr/mn

- Puissance apparente du moteur : $S = UI$ en VA. $I = S / U = 704/230 = 3,06A$.
- Le facteur de puissance est : $\cos \varphi = 0,85$ $\sin \varphi = 0,54$
- Puissance réactive du moteur est : $Q = U * I * \sin \varphi = 230 * 3,06 * 0,54 = 380VAR$

En va simuler cette charge inductive et mettons à la place de premier charge résistive et nous avons obtenus les résultats suivantes :

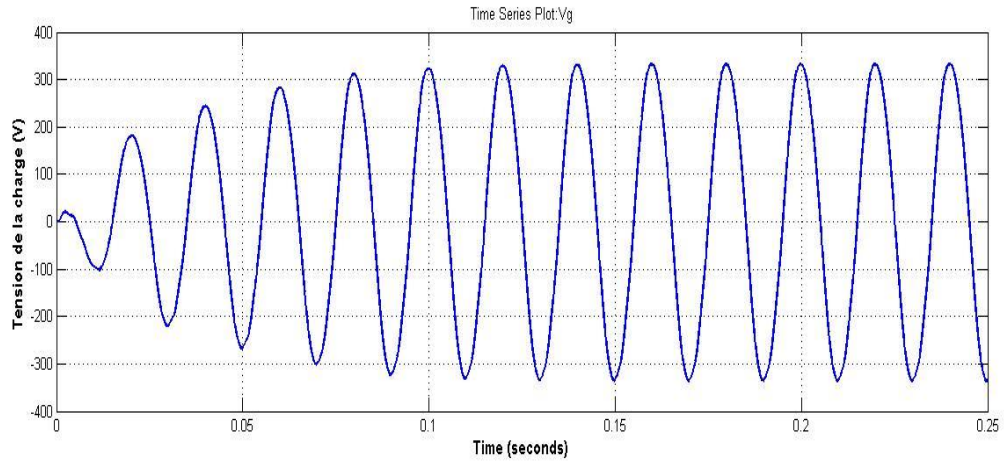


Figure III-43 Tension de la charge inductive

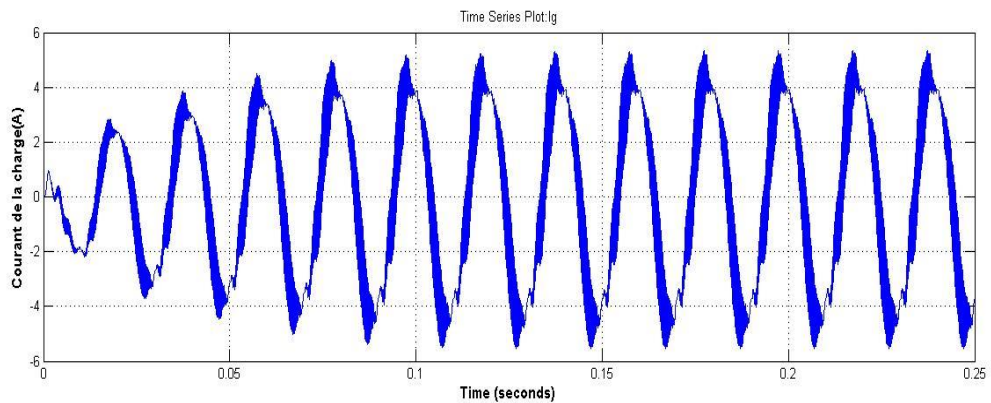


Figure III-44 Courant de la charge inductive

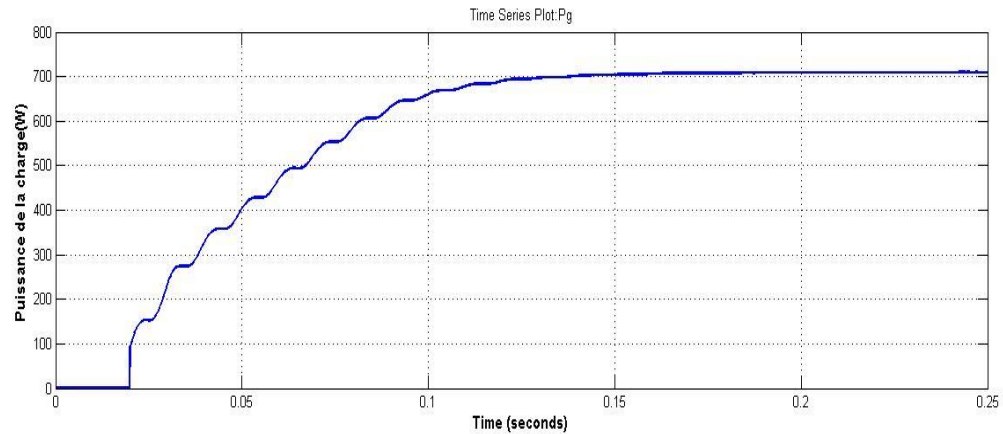


Figure III-45 Puissance de la charge inductive

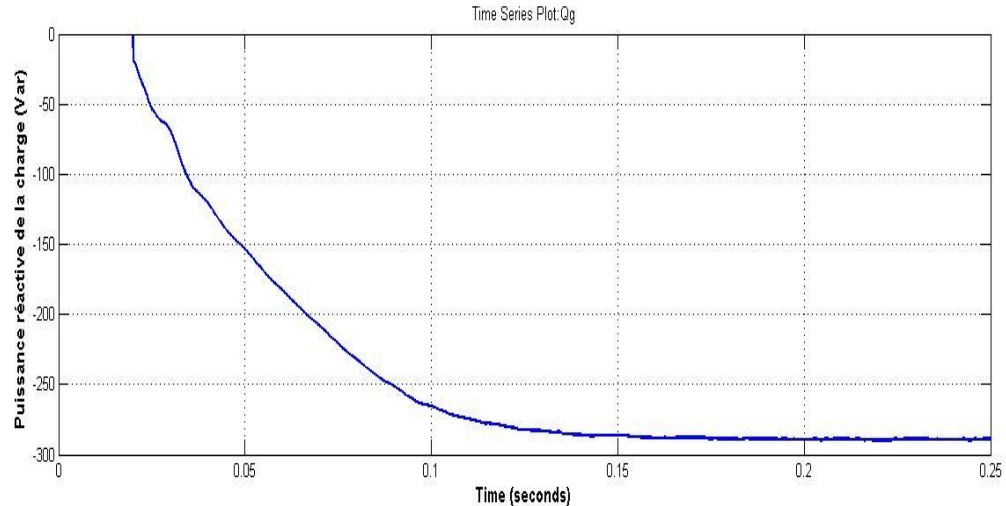


Figure III-46 Puissance réactive de la charge inductive

Interprétation des résultats :

On remarque que la tension électrique a conservé sa forme et sa valeur, tandis que l'on remarque que le courant a une perturbation de sa forme due à l'effet de la charge réactive.

On remarque que la charge est produite la puissance réactive à cause de la circulation des courants dans le bobinage de la machine .

Remarque : Dans notre étude hacheur boost elle est limitée donc nous proposons de la remplacer push-pull.

Conclusion :

En conclusion, le chapitre III offre une vue d'ensemble complète du système photovoltaïque, de sa description et de son dimensionnement à 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

Dans l'ensemble, nous avons couvert plusieurs aspects importants liés au générateur photovoltaïque et au système photovoltaïque. Nous avons commencé par le principe de l'effet photovoltaïque, la composition des cellules PV et l'importance de leurs paramètres pour les performances globales du générateur. Ensuite, nous nous sommes penchés sur les convertisseurs statiques, tels que les convertisseurs DC/DC et DC/AC, et leur commande. Nous avons étudié des concepts clés tels que la commande MPPT, les techniques P&O, la régulation des courants et des tensions, ainsi que l'utilisation des régulateurs PI et la référence dq. Ces éléments sont essentiels pour maximiser l'efficacité et l'extraction de puissance des panneaux solaires.

Enfin, nous avons abordé le système photovoltaïque dans son ensemble, en décrivant sa structure, son dimensionnement et son fonctionnement dans différentes conditions environnementales. Grâce à des simulations et des évaluations, nous avons pu évaluer les performances du système et identifier les paramètres clés qui influencent son efficacité énergétique. Ces connaissances sont cruciales pour concevoir, optimiser et exploiter efficacement les systèmes photovoltaïques.

En combinant ces informations, nous avons acquis une compréhension approfondie des différents aspects du générateur photovoltaïque et du système photovoltaïque. Cela nous permettra d'appliquer ces connaissances dans la conception et l'exploitation de systèmes solaires efficaces et fiables, contribuant ainsi à l'utilisation croissante de l'énergie solaire en tant que source d'énergie renouvelable.

Bibliographie

- [1]. HelaliKamelia "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 solaire Les bases de de l'energie 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 Viloz , " Installations photovoltaïques " , 5 édition , Le moniteur,Paris,2012.
- [6]. MEZIANI Zahra,"MODELISATION DE MODULES PHOTOVOLTAIQUES"mémoir de magister,UNIVERSITE De BATNA,juin2012.
- [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 CHOHRAOUI et RatibaHADBI , "modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau", mémoire de Master,UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMEN,juin 2016.
- [10]. BENHADDOUCHE Nesrine Fatima, "la commande d'un système photovoltaïques d'un satellites"Mémoire de master universite Abou bekerBelkaid 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.Slamafateh,"Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique " , UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF-UFAS (ALGERIE).
- [14]. <https://gootrio.com/modelisation-dune-cellule-photovoltaique-sous-matlab-simulink/>
- [15]. ZIAT SoheirIbtissem 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 Bouchaïb 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 tracking 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 contrôle 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 photovoltaïque.» université ghardaia , 2022.
- [24]. MECHALIKH M.Nadjib,HAMADACHaraf 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.

