

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY

جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté: Sciences de l'Ingénierat
Département : Électrotechnique
Domaine: Sciences et Technologie
Filière : Électrotechnique
Spécialité : électrotechnique industrielle

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque

Présenté par : **ABEDDOU SOUMAYA*

**MOUADNA AYMEN*

Encadrant : *OUARI Ahmed* Pr. *Université d'Annaba*

Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Université	Président
Nom et prénom	Grade	Université	Encadrant
Nom et prénom	Grade	Université	Co-encadrant
Nom et prénom	Grade	Université	Examinateur
Nom et prénom	Grade	Université	Deuxième examinateur / Membre invité

Année Universitaire : 2019/2020

Dédicaces

Le bonheur ne se construit pas lui-même ...

Mais avec l'aide d'autrui de soi-même...

Pourtant la vérité défile une devant nos yeux...

Et les yeux, c'est connu sont le miroir de l'âme...

Ce travail est dédié

A mes très chers parents

ABDENNOUR et DRAHEM

Pour leurs encouragements, sacrifice et

Leurs patiences, la longe de ma formation

A mes frères : BADR EDDINE, BASSEM, HOUSSEM EDDINE

A mes sœurs : CHAHRAZED, OUMAIMA

Pour mes meilleures amies : Hadjer, Karima, RANDA, SAWSEN, MARWA.

Aussi pour mon Vien selle : MANSOUR.

Et toute la promotion d'Electrotechnique 2020

A mon binôme AYMEN

SOUMAYA

Une salutation d'appréciation et merci à tous ceux qui ont participé et nous ont accompagnés dans notre carrière d'études et une lettre d'amour à tous nos proches et connaissances.

AYMEN

Remerciements

Je tiens remercier, tout d'abord **Dieu** qui m'a permis d'apprécier le plaisir de la vie estudiantine.

Je tiens à remercier très fort mon encadreur Pr. Ouari Ahmed, qui m'a soutenu, encouragé et aidé pendant tout le cycle.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour réaliser ce travail.

En fin, toute ma gratitude et mes respects à tous les enseignants du département d'électrotechnique qui ont contribué à l'établissement de notre projet de fin d'études.

ملخص

الهدف من هذه الرسالة هو ضمان حقن الطاقة الكهربائية التي تنتجها محطة الطاقة الكهروضوئية في شبكة التوزيع يتضمن تكوين هذا النظام مولدًا ضوئيًا، متصلًا بمروحية معززة، وعاكس جهد متعدد العجل ومرشح وحمل . من أجل التشغيل الأمثل للنظام، يجب ضمان التشغيل بأقصى طاقة للمولد الكهروضوئي (MPPT) مهما كانت الظروف المناخية.

تم إجراء التكيف بين المولد الكهروضوئي والحمل باستخدام محول DC / DC ويتم حقن الطاقة في الشبكة باستخدام عاكس متعدد المستويات مع تحكم PWM ثلاثي الجيبات المتناظرة.

الكلمات المفتاحية : مصادر كهروضوئية، جودة الطاقة، شبكة التوزيع .

Abstract

The objective of this thesis is to ensure the injection of electrical energy produced by a PV power plant into the distribution network. The configuration of this system includes a photovoltaic generator, connected to a booster chopper, a multi-level voltage inverter and a filter and the load.

For optimal system operation, operation at maximum power of the photovoltaic generator (MPPT) must be ensured whatever the climatic conditions.

The adaptation between the photovoltaic generator and the load was carried out using the DC / DC converter. And energy is injected into the grid using a multi-level inverter with multiple triangulated-sinusoidal PWM control.

Keywords : photovoltaïques sources, énergie qualité, Distribution network

Résumé

L'objectif de ce mémoire est d'assurer l'injection l'énergie électrique produite par un centrale PV au réseau de distribution. La configuration de ce système comporte un générateur photovoltaïque, connecté à un hacheur survolteur, un onduleur de tension multi veaux et un filtre et la charge.

Pour un fonctionnement optimal du système, on doit assurer un fonctionnement à puissance maximale du générateur photovoltaïque (MPPT) quel que soit les conditions climatiques.

L'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge a été effectuée moyennant le Convertisseur DC/DC. Et l'injection d'énergie vers le réseau est assuré vie un onduleur multi niveaux à commande MLI triangulé- sinusoïdale multiple.

Mots clés : sources photovoltaïque, qualité d'énergie, Réseau de distribution

Liste des figures

Fig.1 Relations entre les différentes formes d'énergie.....	1
---	---

Chapitre I

Figure I.1: Différents types d'énergies renouvelables.....	3
Figure I.2: L'énergie hydraulique.....	4
Figure I.3: L'énergie éolienne.....	5
Figure I.4: Différents types de biomasse.....	6
Figure I.5: La géothermie.....	7
Figure I.6: L'énergie solaire.....	8

Chapitre II

Figure II.1: Structure de cellule solaire.....	11
Figure II.2 : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction.....	12
Figure II.3 : Cellule monocristalline.....	12
Figure II.4 : Cellule poly cristalline.....	13
Figure II.5 : Cellule amorphe.....	13
Figure II.6 : Caractéristiques I(V) d'une cellule photovoltaïque soumise à différents Éclairéments.....	14
Figure II.7 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques.....	16
Figure II.8 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de Np cellules identiques.....	16
Figure II.9: Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.....	17
Figure II.10: Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température.....	18
Figure II.11 : Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome.....	18
Figure II.12 : Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau.....	19
Figure II.13 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC contrôlé par Une commande MPPT sur charge DC.....	20
Figure II.14 : Caractéristique P-V selon la méthode P&O.....	22
Figure II.15 : Les différents types d'onduleur.....	23

Chapitre III

Figure III.1 : Schéma équivalent d'une cellule idéale.....	26
Figure III.2 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	27
Fig. III.3 Circuit électrique de l'hacheur Boost.....	28
Figure III.4 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.....	29
Figure III.5 : Circuit équivalent du boost lorsque S fermé.....	29
Figure III.6 : Circuit équivalent du boost lorsque S ouvert.....	30
Figure III.7 : Schéma bloc d'un hacheur boost.....	31
Fig. III.8 Tension d'entrée.....	32
Fig. III.9 Tension de sortie.....	32
Figure III.10: Courant de sortie du hacheur.....	32
Figure III.11: la puissance de sortie du hacheur.....	32
Figure III.12 : Schéma de simulation de panneaux photovoltaïque avec un hacheur boost.....	33

Figure III.13 : variation temporele du courant.....	34
Figure III.14 : variation temporele de la tension.....	34
Figure III.15 : variation temporele de la puissance.....	34
Figure III.16 : caractéristique I-V.....	34
Figure III.17 : Caractéristique P-V.....	34
Figure III.18 : variation temporele du courant.....	35
Figure III.19 : variation temporele de la tension.....	35
Figure III .20 : variation temporele de la puissance.....	35
Figure III.21 : La variation de la température.....	36
Figure III.22 : Tension de sortie du hacheur.....	36
Figure III.23 : Courant de sortie du hacheur.....	36
Figure III.24 : Puissance de sortie du hacheur.....	36
Figure III.25 : La variation de l'irradiation.....	37
Figure III.26 : Tension de sortie du hacheur.....	37
Figure III.27 : Courant de sortie du hacheur.....	37
Figure III.28 : Puissance de sortie du hacheur	
Figure III.29 : Signal de la gâchette d'IGBT du hacheur (MPPT).....	37
Figure III.30 : Structure d'un onduleur triphasée.....	38
Figure III.31 : Signale de la commande MLI et les impulsions des interrupteurs.....	40
Figure III.32 : Schéma global de simulation d'un panneau photovoltaïque raccordé au réseau Électrique.....	40
Figure III.33 : Tensions de réseau V_{abc}	41
Figure III.34 : Courants du réseau I_{abc}	41
Figure III.35 : Variation de l'irradiation G utilisé.....	41
Figure III.36 : Tension de sorti de l'onduleur V_{abc}	42
Figure III.37 : Courant de sorti de l'onduleur I_{abc}	42
Figure III.38 : Couplage de tension de sortie de l'onduleur avec le réseau.....	42
Figure III.39 : Variation de la température utilisée.....	43
Figure III.40 : Tension de sorti de l'onduleur V_{abc}	43
Figure III.41 : Courant de sorti de l'onduleur I_{abc}	43
Figure III.42 : Couplage de tension de sortie de l'onduleur avec le réseau.....	44

Liste des Tableaux

Chapitre I

Tableau I. Avantages et inconvénients de chaque énergie renouvelable.....9

Chapitre II

Tableau II.1 : Comparaison les principaux convertisseurs DC-DC.....21

Tableau II.2 : Caractéristiques techniques des différents systèmes de configuration.....24

Liste des abréviations

PV	: Panneau Photovoltaïque
GPV	: Générateur Photovoltaïque
P-N	: Positive-Négative
FF	: Facteur de forme
AM	: Air mass
D	: Diode de roue libre
DC/DC	: Continu/Continu
DC/AC	: Continu/Alternative
MPPT	: Maximum Power Point Tracking
PPM	: Point de puissance Maximale
P&O	: Perturbation et Observation
MLI	: Modulation de largeur d'impulsion
PWM	: Pulse Width Modulation
PLL	: Phase Locked Loop
THT	: Très haute tension
HT, HTB	: Haute tension
MT, MTA	: Moyenne tension
BT	: Basse tension
PI	: Proportionnel Intégral

Liste des Symboles

Symbole	Désignation
I	Le courant fourni par la cellule(A)
V_{pv}	La tension aux bornes de la cellule(V)
I_d	Le courant de diode(A)
I_{ph}	Photo courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation (A)
I_{sh}	Le courant dérive par la résistance parallèle (A)
I_s	Le courant de saturation(A)
I_{sn}	Le courant de court-circuit de référence(A)
V_t	Tension thermique donnée par représente la potentielle Thermodynamique (V)
R_{sh}	Résistance en parallèle (Ω)
R_s	Résistance en série (Ω)
T_c	Température de la cellule K°
T_a	Température ambiante K°
T_n	Température du fonctionnement nominal C°
G	L'irradiation solaire en ($W = m^2$)
A	Facteur d'idéalité relatif au module ($1 < a < 2$)
Q	Charge de l'électron ($q = 1.6 \cdot 10^{-19}C$)
K	Constant de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}J=K$)
K_i	Coefficient de la température
P	Puissance fournie par GPV (W)
I_{cc}	Courant de court de circuit(A)
V_{co}	Tension de circuit ouvert (A)
P_{max}	Puissance Maximale (W)
V_{opt}	Tension optimale (V)
I_{opt}	Courant optimum (A)
P_{inc}	Puissance incidente (W)
N_s	Nombre de cellule en Série
N_p	Nombre de cellule en parallèle
I_{sc}	Courant de court-circuit en série(A)
V_{sco}	Tension de circuit ouvert en série (V)
I_{pcc}	Courant de court-circuit en parallèle (A)
V_{pco}	Tension en circuit ouvert en parallèle (V)
V_{pm}	Tension de puissance maximale (V)
I_{pm}	Courant de puissance maximale (A)
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)
T_e	Période des impulsions (s)
F_e	Fréquence (Hz)
T	Temps (s)
P_c	Puissance de charge (W)
F_s	Fréquence de commutation (rad/s)
T_s	Temps de commutation(s)

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Energies renouvelables	
Introduction.....	3
I.1.Définition des énergies renouvelables.....	3
I.2.Les différents types d'énergies renouvelables	3
I.2.1. L'énergie hydraulique.....	4
I.2.2. L'énergie éolienne	4
I.2.3. L'énergie de biomasse.....	4
I.2.4. L'énergie géothermie.....	6
I.2.5. L'énergie solaire.....	7
I. 3. Les avantages et les inconvénients de l'énergie renouvelable.....	9
Conclusion.....	10
Chapitre II : Système Photovoltaïque	
Introduction	11
II.1. Cellule photovoltaïque.....	11
II.2. Principe de fonctionnement.....	12
II.3. Différents types des cellules solaires.....	12
II.3.1. Les cellules monocristallines.....	12
II.3.2. Cellules poly cristallines.....	13
II.3.3. Cellules amorphes.....	13
II.4. Caractéristique de la cellule photovoltaïque.....	13
II.4.1. Tension de circuit-ouvert (V_{co}).....	14
II.4.2. le courant de court-circuit.....	15
II.4.3. Les valeurs V_{max} et I_{max}	15
II.4.4.Le facteur de forme FF.....	15
II.4.5. Le rendement.....	15
II.5. Association des cellules photovoltaïques.....	15
II.5.1. Association en série.....	16
II.5.2. Association en parallèle.....	16
II.5.3. Association mixte.....	17
II.6. Influence de la température et de l'éclairement	17
I.6.1. Influence de l'éclairement L'énergie électrique.....	17
I.6.2 Influence de la température	17
II.7 Les différents types des systèmes photovoltaïques.....	18
II.7.1 Alimentations électriques faibles puissances	18
II.7.2 Installations électriques photovoltaïques autonomes.....	18
II.7.3 Installations ou centrales électriques photovoltaïques raccordées au réseau.....	19
II.7.4 Installations ou centrale électriques photovoltaïques hybride	19
II.8. Étage d'adaptation d'un générateur photovoltaïque à la charge.....	19
II.8.1. Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC.....	20
II.8.2. Convertisseur DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire.....	20
II.8.3. Principe de fonctionnement de MPPT	21
II.8.4. Méthode de perturbation et observation.....	22
II.9. La connexion GPV-charge via un étage d'adaptation continu alternatif.....	22
II.9.1. L'onduleur central.....	23
II.9.2. Les onduleurs strings.....	23
II.9.3. Les onduleurs intégrés aux panneaux PV.....	24
Conclusion.....	25

Chapitre III : Modélisation et simulation d'un module photovoltaïque

Introduction :	26
III.1. Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque	26
III.1.1. Cas d'une cellule idéale :	26
III.1.2. Cas d'une cellule réelle :	27
III.2. Hacheur survolteur (boost) : modélisation et simulation	28
III.2.1. Principe de fonctionnement et circuit équivalent :	28
III.2.2. Simulation du système PV-Hacheur avec la commande MPPT :	33
III.2.2.1. Modèle avec irradiation et température constante:	34
III.2.2.2. Modèle avec température variable et irradiation variable:	36
III.3. Modélisation et simulation d'un Onduleur :	38
III.3.1. Structure de l'onduleur :	38
III.3.2. Commande de l'onduleur	39
III.4. Simulation globale de PV raccordé au réseau :	40
III.4.1. Schéma de simulation :	40
III.4.2. Résultats de simulation :	41
Conclusion.	44
Conclusion générale et perspectives :	45

Références bibliographiques

Introduction générale

L'énergie caractérise la capacité à produire des actions, par exemple à engendrer du mouvement, modifier la température d'un corps ou à transformer la matière. L'énergie provient des différentes sources que l'on trouve dans la nature : le bois, le charbon, le pétrole, le gaz, le vent, le rayonnement solaire, les chutes d'eau, la chaleur interne de la terre et l'uranium. Elle peut prendre différentes formes : chaleur, énergie musculaire, énergie mécanique, chimique, énergie électrique par exemple. Ses formes diverses peuvent se transformer l'une en l'autre.

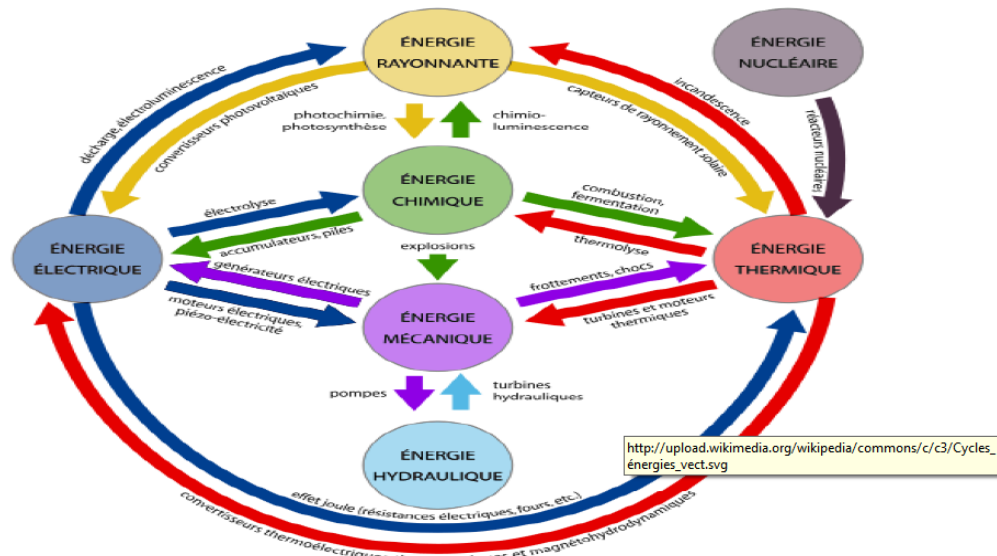


Fig.1 Relations entre les différentes formes d'énergie [1]

L'électricité est aujourd'hui produite dans le monde à près de 80%, grâce à la combustion des carburants fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel) ou de carburants nucléaires. D'après les données de British Petroleum, le charbon s'est accaparé 0.7% supplémentaire des parts du marché de l'énergie, alors que les statistiques du département Américain de l'énergie publiées en 2007 montrent qu'avec des émissions de 11.36 milliards de tonnes (Gt) de dioxyde de carbone (CO₂), ce charbon est devenu en 2005 la première source de pollution devant le pétrole à 11Gt, alors que le gaz naturel émet 5.84Gt. Donc, l'impact environnemental de ces modes de production d'électricité est notable par l'émission des gaz à effet de serre et la génération de déchets radioactifs. L'utilisation de sources propres et renouvelables connaît une croissance significative dans le monde.

La quasi-totalité de la production d'électricité algérienne se base, presque exclusivement, sur le pétrole et le gaz naturel du fait de la large disponibilité des hydrocarbures et de leur faible coût de mise à disposition, par rapport aux énergies renouvelables. Ceci n'exclut pas l'intérêt des énergies renouvelables qui est sous-tendu par les avantages de celles-ci :

- Dispersion dans l'espace. Elles peuvent, par conséquent, être utilisées partout où elles se trouvent ;
- Un potentiel important, particulièrement le solaire. L'Algérie est le premier gisement du bassin méditerranéen à caractère non polluant ;

- Devant la demande croissante en énergie électrique, essentiellement, pour les besoins des régions éloignées, désertes et montagneuses, les systèmes photovoltaïques commencent à trouver de grandes applications.

Le but de ce travail est la conception d'un système de conditionnement pour raccorder les systèmes photovoltaïques au réseau électrique.

Ce mémoire contient trois chapitres :

Au premier chapitre, les énergies renouvelables et leur comparaison avec les énergies fossiles sont évoquées et puis sont présentées les spécificités de l'énergie solaire par l'utilisation des panneaux photovoltaïques.

Le deuxième chapitre décrit une étude préliminaire de la cellule photovoltaïque et ses caractéristiques électriques. Par la suite, la structure, le principe et les types de convertisseur continu/continu (DC/DC) sont développés. Le modèle mathématique de la cellule photovoltaïque et la stratégie de commande sont abordés.

Dans le troisième chapitre, le raccordement du système photovoltaïque au réseau électrique via un onduleur de tension est étudié en prenant en considération essentiellement le système de synchronisation phase lock label (PLL).

Chapitre I :

Energies Renouvelables

Introduction :

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas du tout une nouveauté ; dans l'histoire de l'humanité, les énergies renouvelables ont été pendant longtemps la première possibilité de produire de l'énergie. Ceci a seulement changé avec la révolution industrielle. Qui apparaît à travers deux petits pics, l'un au cours du 19^{ième} siècle avec le charbon et la découverte des machines à vapeur, l'autre au 20^{ième} siècle avec le pétrole, le gaz et le nucléaire. Ce qui a diminué de l'application des énergies renouvelables en termes absolus et relatifs ; sans compter quelques exceptions. Les énergies renouvelables ont eu une importance secondaire dans la production globale d'énergie.

Dans ce chapitre, les énergies renouvelables, les différents types, leurs avantages et inconvénients seront définis.

I.1.Définition

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressources illimitées. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la ressource d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle provient de ressources que la nature renouvelle en permanence, par opposition à une énergie non renouvelable dont les stocks s'épuisent.

Les énergies renouvelables proviennent de deux grandes ressources naturelles : le Soleil à l'origine du cycle de l'eau, des marées, du vent et de la croissance des végétaux et de la Terre qui dégage de la chaleur. Surnommées "énergies propres" ou "énergies vertes" (fig. I.1), leur exploitation engendre très peu de déchets et d'émissions polluantes mais leur pouvoir énergétique est beaucoup plus faible que celui des énergies non renouvelables.



Fig. I.1: Différents types d'énergies renouvelables [2]

I.2.Les différents types d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables ont plusieurs ressources. On se limite de manière généralement à cinq ressources fondamentales [2] :

I.2.1. L'énergie hydraulique

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 GW, soit environ 19% de la puissance électrique mondiale. Près de 15 % de toute l'électricité installée en Europe est d'origine hydraulique. La production d'électricité hydraulique exploite l'énergie mécanique (cinétique et potentielle) de l'eau (fig. I.2). Le principe utilisé pour produire de l'électricité avec la force de l'eau est le même que pour les moulins à eau de l'Antiquité. Au lieu d'activer une roue, la force de l'eau active une turbine qui entraîne un alternateur et produit de l'électricité [3].



Fig. I.2 : L'énergie hydraulique [3]

I.2.2.L'énergie éolienne :

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre (fig. I.3). Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. En Europe, principalement sous l'impulsion Allemande, Scandinave et Espagnole, on comptait en 2000 environ 15000 MW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27000 MW pour 40000MW de puissance éolienne installée dans le monde. Pour l'année 2010, une puissance éolienne installée en Europe de l'ordre 70000 MW [4].

I.2.3 L'énergie de biomasse :

La biomasse est la source d'énergie la plus ancienne utilisée par l'humanité. Il s'agit de toute matière organique végétale ou issue des êtres vivants (fig. I.4). Elle comprend donc aussi tous les déchets organiques. Elle est très utilisée, notamment pour produire de la chaleur. Elle représente environ 10% de l'énergie primaire mondiale et se trouve souvent dans les circuits

non commerciaux. Pour environ 2,6 milliards d'habitants, elle représente quasiment la seule source d'énergie [5].



Fig. I.3. : L'énergie éolienne [4]

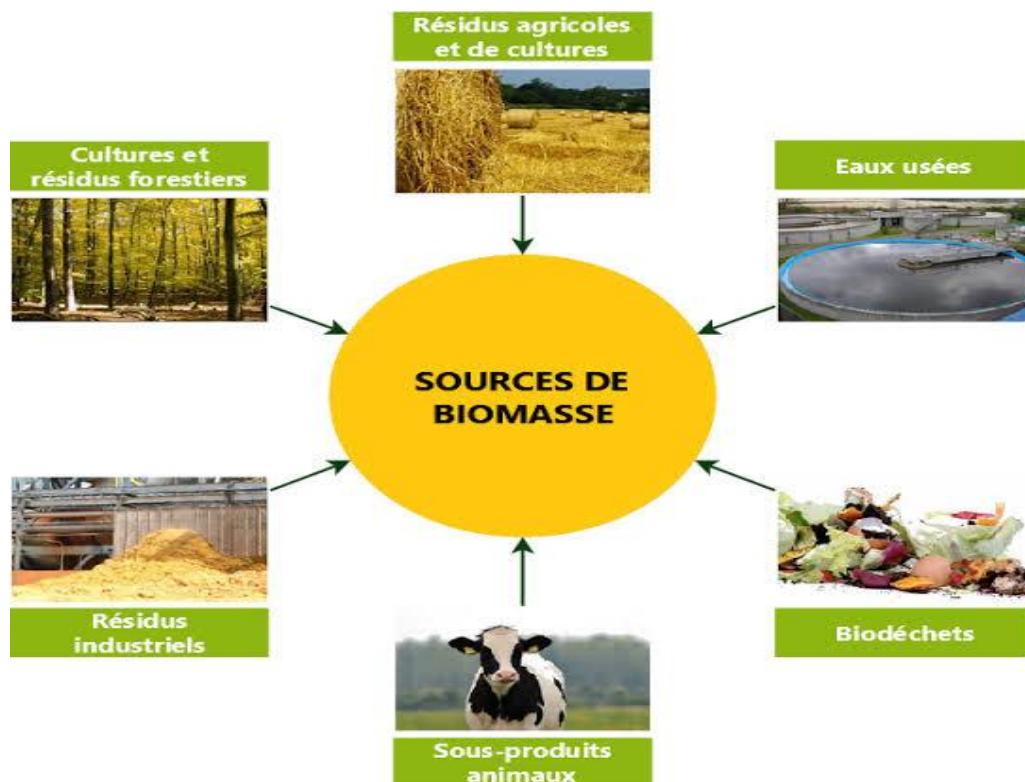


Fig. I.4. : Différents types de biomasse [5].

I.2.4 L'énergie géothermie :

La géothermie désigne l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur. Classiquement, trois types de géothermie -à haute énergie, basse énergie et très basse énergie- sont distingués selon le niveau de température disponible à l'exploitation.

Pour utiliser cette énergie souterraine, on envoie de l'eau froide sous la Terre. Cette eau froide se réchauffe. Elle est alors pompée et ramenée à la surface où elle est utilisée soit pour produire de l'électricité dans une centrale, soit directement en tant qu'eau chaude dans les logements (eau chaude pour la douche, les radiateurs...) (fig. I.5) [6].



Fig. I.5.: La géothermie [6].

I.2.5 L'énergie solaire :

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante [6]. La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) (fig. I.6) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à 1367W/m^2 . La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m^2 et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie.



Fig. I.6.: L'énergie solaire [7].

Différents types d'énergies solaires [8] : Sur Terre, il existe différents types d'énergies solaires : passive, thermique, photovoltaïque et thermodynamique

L'énergie passive : C'est une énergie non polluante et qui est disponible en grande quantité. Ce type d'énergie est utilisé pour le chauffage, pour l'éclairage naturel et la climatisation des locaux.

Son fonctionnement : l'énergie lumineuse du soleil qui pénètre à l'intérieur des pièces par les fenêtres et qui est absorbée par les murs mais aussi par les meubles, par les planches, est rejetée sous forme de chaleur.

L'énergie solaire thermique : Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique c'est-à-dire en chaleur. Cette énergie peut être utilisée directement soit pour le chauffage mais aussi pour obtenir de l'eau chaude.

Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques. Ces mêmes absorbeurs réchauffent alors un réseau de tuyaux où circule un fluide caloporteur (c'est-à-dire un fluide qui reçoit de la chaleur en un point de son circuit et qui la cède en un autre point). Cet échangeur va ensuite chauffer à son tour de l'eau stockée dans un cumulus, cette même eau ira alimenter chauffe-eau (pour l'eau sanitaire) et systèmes de chauffages solaires.

L'énergie photovoltaïque : Cet effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. Cette forme d'énergie reste aujourd'hui quantitativement négligeable mais on lui prédit un grand avenir, son coût baissera fortement dans les années à venir. Cette énergie sera durable et ne devra nécessiter d'aucun entretien. Elle peut répondre aux besoins en énergie électrique d'une maison, contrairement aux autres formes d'énergies solaires qui ne produisent que de la chaleur grâce aux capteurs du panneau qui transforment les rayonnements du soleil en cellule photovoltaïque. Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui exposé à la lumière, génère une tension électrique, ces cellules se présentent sous la forme de

deux fines plaques. Le courant qui en ressort est continu donc cette énergie produit de l'électricité.

L'énergie thermodynamique : L'énergie solaire thermodynamique est un moyen de produire de l'électricité et d'accumuler l'énergie thermique nécessaire à cette production pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, dans des centrales solaires à concentration. Le principe est de concentrer la chaleur du soleil par des miroirs pour chauffer une fluide haute température (plusieurs centaines de degrés) afin de générer de la vapeur par échange thermique pour ensuite produire de l'électricité au moyen d'une turbine. Le fluide utilisé peut conserver sa chaleur pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, cela permet de produire de l'électricité en début de soirée, au moment où la consommation est la plus importante.

Cette énergie solaire thermodynamique est semblable au principe d'une centrale électrique classique.

I. 3. Avantages et inconvénients des énergies renouvelables :

Tableau 1. Avantages et inconvénients de chaque énergie renouvelable

Les énergies	Avantages	Inconvénients
L'énergie Hydraulique	<ul style="list-style-type: none"> - Energie naturelle non polluante. - Retenues d'eau possible dans différents endroits. 	<ul style="list-style-type: none"> - Perturbation de l'équilibre écologique. - Grands barrages coûteux.
L'énergie Eolienne	<ul style="list-style-type: none"> - Il y a toujours du vent dans un même endroit, jour et nuit. - Tout le mécanisme est dans l'éolienne, donc pas de grandes usines. - Energie non-polluante. 	<ul style="list-style-type: none"> - Un impact visuel. - Le prix couteux. - La migration des oiseaux.
L'énergie Biomasse	<ul style="list-style-type: none"> - Les ressources de la biomasse sont disponibles à grande échelle. - La biomasse peut être convertie en différentes formes d'énergie. 	<ul style="list-style-type: none"> - Source d'énergie peu dense. - l'exploitation des bois des forêts doit s'accompagner de nouvelles plantations.
L'énergie Géothermique	<ul style="list-style-type: none"> - Pollution non-toxique. - Beaucoup d'énergie pour peu de place. 	<ul style="list-style-type: none"> - Répartitions des sources. - Installation coûteuse.
L'énergie Solaire	<ul style="list-style-type: none"> - Excellente source d'énergie renouvelable. - Energie non-polluante. - La lumière ne coûte rien - Peut de soutien et dure longtemps. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de lumière la nuit. - A besoin de beaucoup d'espace. - Le placement peut modifier l'énergie pris dans les panneaux - Panneaux fragile.

Conclusion :

Les énergies renouvelables sont des énergies dont les ressources sont illimitées et dont l'exploitation est écologique ne génère de gaz à effet de serre. Parmi elle, l'énergie solaire, ressource propre, accessible, abondante et inépuisable offre d'intéressantes perspectives de développement. Dans plusieurs pays industrialisés, le marché de l'énergie solaire photovoltaïque est en très forte croissance, grâce à des installations raccordées au réseau électrique national, et fait bénéficier les utilisateurs de l'électricité d'un prix incitatif. Dans le chapitre suivant l'étude d'un système photovoltaïque sera abordée.

CHAPITRE II :

Systeme

Photovoltaïque

Introduction :

Depuis plusieurs années, l'être humain a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil. La plupart des utilisations sont directement liées à la vie de tous les jours comme dans les diverses applications de séchage et chauffage autant artisanales qu'industrielles ou bien dans des phénomènes de réactions chimiques comme la photosynthèse.

Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface de la terre malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère. Cette énergie est de l'ordre de 1000 W/m^2 dans les zones tempérées et atteint 1400 W/m^2 dans les zones où l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou chargée d'eau.

Sachant que l'intensité du flux solaire reçu au niveau du sol dépend de :

- L'orientation, la nature et de l'inclinaison de la surface terrestre.
- L'altitude, la latitude et du degré de pollution du lieu de collecte.
- La période de l'année, ainsi que de l'instant considéré dans la journée.
- La nature des couches nuageuses.

Ce chapitre a pour but d'expliquer le principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque. Ensuite, une étude préliminaire des convertisseurs utilisés dans les systèmes photovoltaïques est effectuée.

II.1 Cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est conçue en se basant sur le phénomène physique appelé « effet Photovoltaïque »[9]. Une force électromotrice apparaît 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, sa disposition, température de la cellule ainsi que le vieillissement de la cellule.

Une cellule photovoltaïque est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P et l'autre couche dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel comme montré dans la figure II-1.

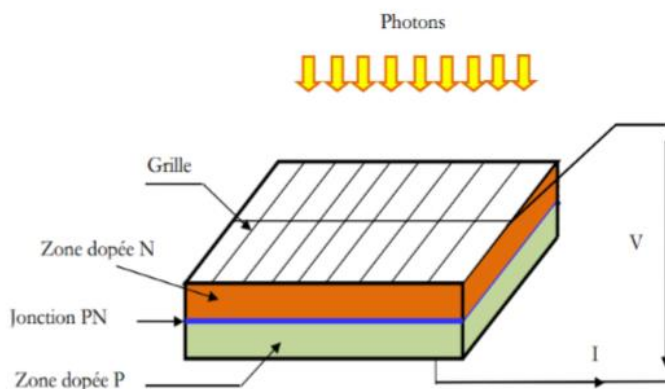


Fig. II-1 : Structure de cellule solaire [9].

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.

II.2 Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement des cellules PV repose sur un effet physique appelé : l'effet photovoltaïque, qui se traduit par la transformation directe de la lumière en électricité (courant continu cc)[10]. Son principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie ($h\nu$), si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de ce semi-conducteur ($E_g = E_C - E_V$), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition de paires électron-trou dans différents points de la jonction (fig. II.2). Donc toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement le passage des porteurs majoritaires.

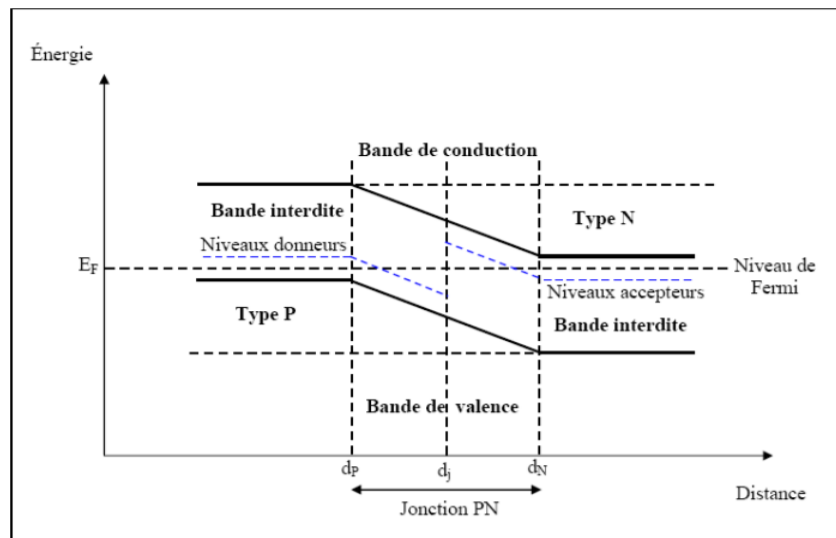


Fig. II.2 : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction [10].

II.3 Différents types des cellules solaires:

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle et sont [11] :

II.3.1 Les cellules monocristallines:

- Cellules monocristallines : Ce sont celles qui ont le meilleur rendement mais aussi le cout le plus élevé.

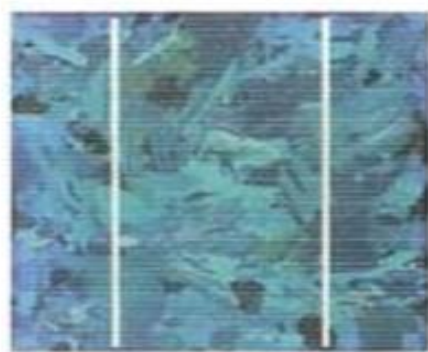


Fig. II.3 : Cellule monocristalline [11].

II.3.2 Cellules poly cristallines:

Leurs coût de fabrication est moins important, vu leur conception facile. Cependant leur rendement est plus faible.

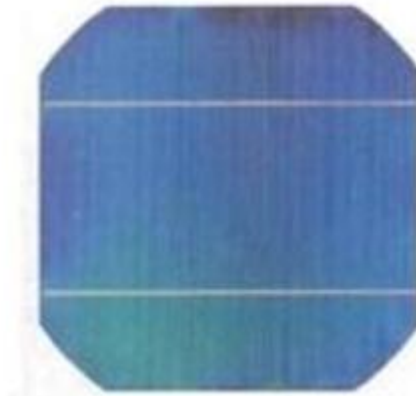


Fig. II.4 : Cellule poly cristalline [11].

II.3.3 Cellules amorphes:

Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

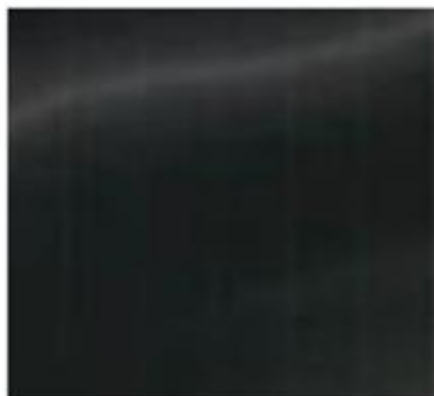


Fig. II.5 : Cellule amorphe [11].

II.4 Caractéristique de la cellule photovoltaïque

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont caractérisées par un certain nombre de paramètres, qui sont extraits de sa courbe caractéristique courant-tension, tels que la tension de circuit-ouvert V_{co} et le courant de court-circuit (I_{cc}). Par ailleurs, ces valeurs peuvent être influencées fortement en fonction de l'ensoleillement, de la température et du matériau utilisé. La Figure II.1, représente les caractéristiques typiques mesurables $I_{cell} = f(V_{cell})$ d'une jonction PN soumise à un flux lumineux constant et un autre dans l'obscurité [12].

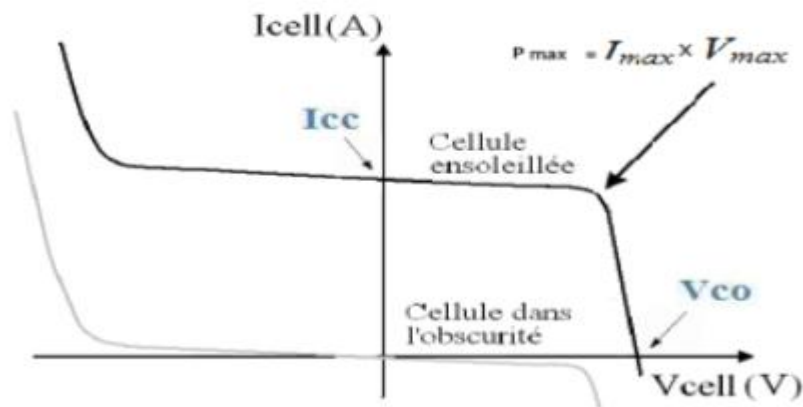


Fig. II.6 Caractéristiques I(V) d'une cellule photovoltaïque Soumise à différents éclairagements [12].

II.4.1 Tension de circuit-ouvert (Vco):

C'est la tension Vco pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul. C'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque [13].

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{eV_{pv}}{nKT} \right) - 1 \right] \frac{V_{pv}}{R_{shu}}$$

Avec :

- Icc : Icc est le courant maximal que peut fournir une cellule PV éclairé lorsque ses bornes sont en court-circuit.
- Isat : Courant de saturation.
- e : Charge de l'électron ($e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C).
- Vpv : Tension aux bornes de cette même cellule.
- n : Facteur d'idéalité de jonction ($1 < n < 3$).
- K : Constante de Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K).
- T : Température effective des cellules en kelvin (K).
- Rshu : Résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction.

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

$$V_{co} = V_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right)$$

Où :

- Vco : Tension maximale d'une cellule photovoltaïque, qui est d'environ 0.5 à 0.8V et peut être directement mesurée à ses bornes sans charge.
- VT : Tension thermique
- Iph : Photo-courant de la cellule.
- Isat : Courant de saturation.

II.4.2 le courant de court-circuit :

Si on court-circuite une cellule photovoltaïque on obtient une tension nulle ($V=0$) et un courant qui s'appelle le courant de court-circuit I_{cc} [14].

II.4.3 Les valeurs V_{max} et I_{max} :

Les valeurs V_{max} et I_{max} sont définies de telle sorte que le produit $| V_{max} \cdot I_{max} |$ soit maximal. Ce produit correspond à la puissance maximale P_{max} pouvant être délivrée par la cellule photovoltaïque [15].

II.4.4 Le facteur de forme FF:

Le facteur de forme FF définit l'efficacité de la cellule solaire [16], il est obtenu comme suit :

$$FF = \frac{VM \cdot IM}{Vco \cdot Icc}$$

Avec :

- FF : facteur de forme.
- VM : Tension maximum.
- IM : Courant maximum.
- Vco : Tension de circuit-ouvert.
- Icc : Courant de court-circuit.

II.4.5 Le rendement :

Le rendement (efficacité) des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} . [17].

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \times V_{oc} \times I_{cc}}{P_{in}}$$

Où

- P_m : puissance maximale délivrée par la cellule.
- P_{in} : Puissance incidente = P solaire = 100 W/cm^2
- FF : facteur de forme.
- V_{oc} : Tension de circuit-ouvert.
- I_{cc} : Courant de court-circuit.

La densité de puissance incidente égale à P_{in}/A

Où A : section de la cellule

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

II.5 Association des cellules photovoltaïques :

La puissance générée par une cellule PV est insuffisante pour les applications électriques courantes. L'association de ces cellules en série et/ou en parallèle augmente la puissance produite par celles-ci.

II.5.1 Association en série:

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné [18].

La figure II.7 montre la caractéristique résultante (I_{sc} , V_{sc}) obtenue en associant en série (indice s) n_s cellules identiques (I_{cc} , V_{co}) .
 $I_{sc} = I_{cc}$ et $V_{sc} = n_s V_{co}$.

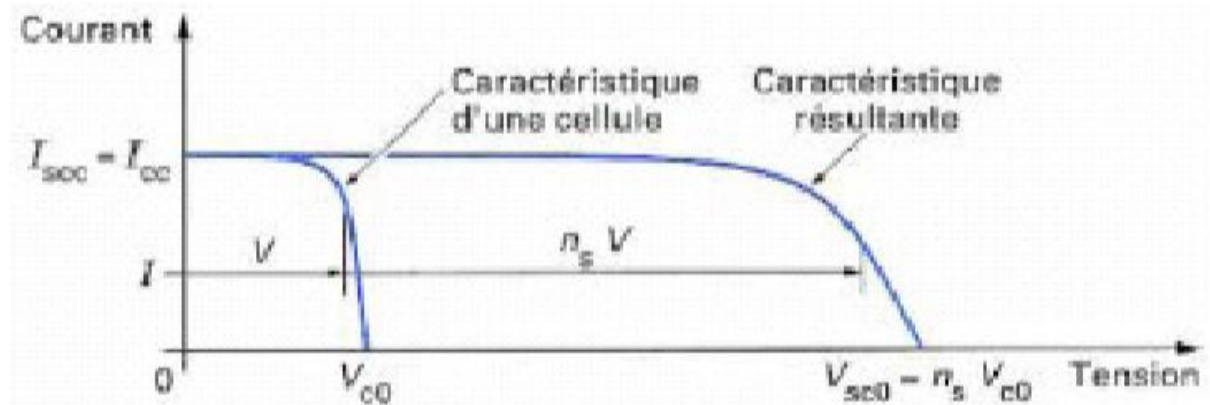


Fig. II.7 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules Identiques [18]

II.5.2 Association en parallèle :

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée [18]. La figure II.8 montre la caractéristique résultante (I_{pcc} , V_{pco}) obtenue en associant en parallèles (indice p) n_p cellules identiques (I_{cc} , V_{co}) .
 $I_{pcc} = n_p I_{cc}$ et $V_{pco} = V_{co}$.

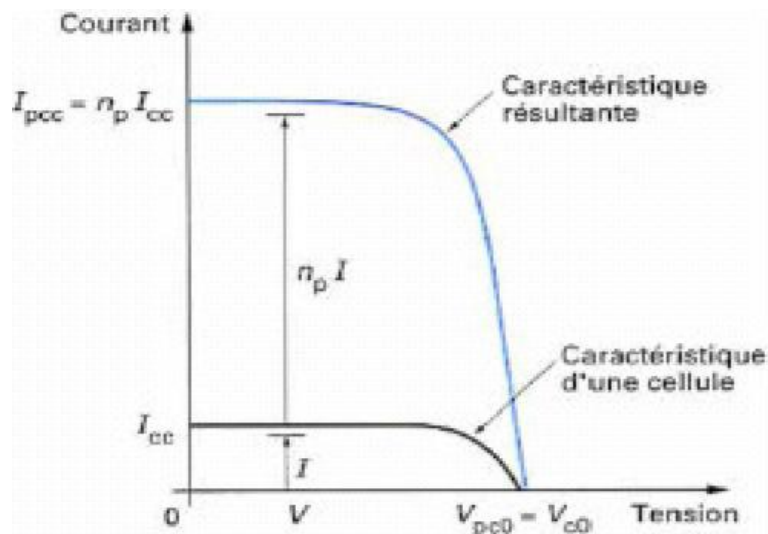


Fig. II.8 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle n_p Cellules identiques [18].

II.5.3 Association mixte :

Pour atteindre une puissance importante, il faut associer plusieurs cellules en série et en parallèle. Cette interconnexion des modules forme un module photovoltaïque.

II.6 Influence de la température et de l'éclairement :

I.6.1. Influence de l'éclairement:

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface [19].

La figure II.9 représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes : le courant est directement proportionnel au rayonnement contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement (fig. II.9).

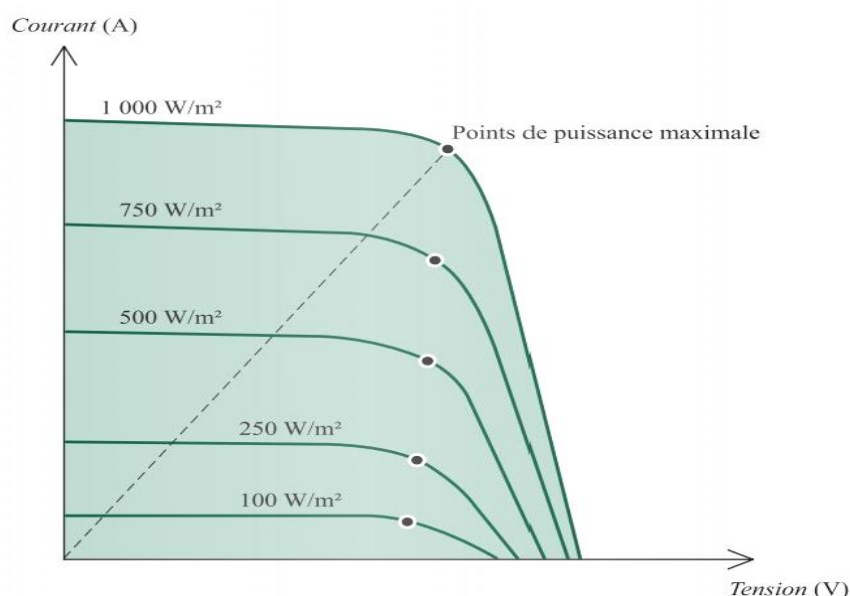


Fig II.9: Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.

I.6.2 Influence de la température

L'influence de la température est importante et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques.

La température est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires, susceptibles de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique elle se dissipe sous forme de chaleur ; c'est pourquoi la température de la cellule (T_c) est toujours plus élevée que la température ambiante (T_a).

$$T_c = T_a + E_m / 800 (TUC - 20)$$

Où :

- T_c : Température de la cellule (°C).
- T_a : température ambiante (°C).
- E_m : Eclairement moyen (W/m^2).

- T_{UC} : Température d'utilisation de la cellule ($^{\circ}C$).

Le graphe de la figure (II.10), montre que la tension d'une cellule baisse fortement avec la température. Plus la température augmente et moins la cellule est performante. En revanche, le courant augmente légèrement en intensité : cette augmentation reste néanmoins négligeable au point de puissance maximale [19].

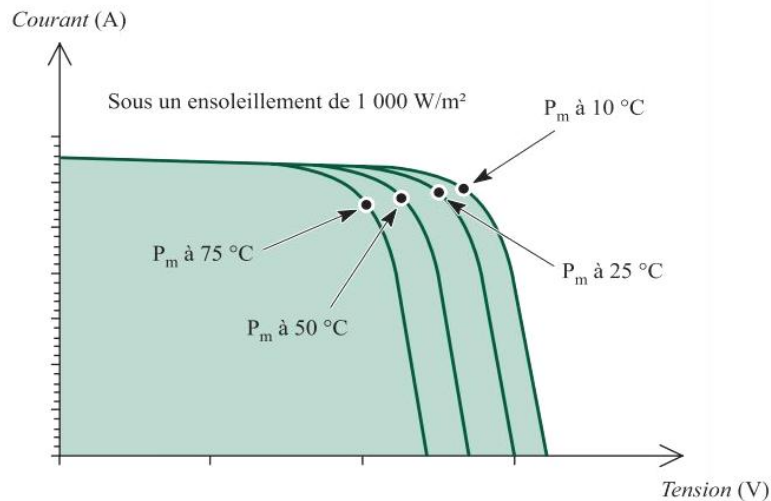


Fig II.10: Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température.

II.7 Les différents types des systèmes photovoltaïques :

II.7.1 Alimentations électriques faibles puissances :

Il s'agit des alimentations électriques faibles telles que les calculettes ou les chargeurs de piles. Les modules photovoltaïques (PV) peuvent faire fonctionner n'importe quel appareil alimenté par des piles.

II.7.2 Installations électriques photovoltaïques autonomes :

En site isolé, le champ photovoltaïque (1) (fig. II.15) peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique). Un système de régulation (2) et une batterie (3) d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique qui sera ensuite utilisée en l'absence du Soleil. Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques.

Le régulateur de charge (2) a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie. En site isolé, on peut aussi utiliser des récepteurs fonctionnant en courant alternatif (6). Dans ce cas, l'installation comprendra un onduleur (4). On peut citer quelques exemples de systèmes autonomes, comme les balises en mer, les lampadaires urbains, le pompage solaire et les maisons en sites isolés.

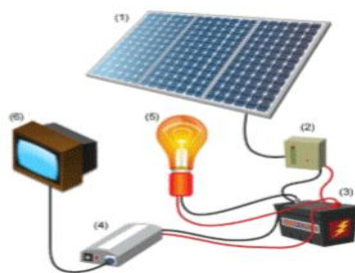


Fig II.11 Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome [20].

La majorité des populations à l'écart des réseaux électriques vit dans des zones rurales, où l'implantation de tels réseaux est difficile, pour des raisons d'accès ou de moyens. Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, ils donnent aux populations un accès à l'électricité avec un coût, une maintenance et des difficultés de mise en œuvre réduits.

II.7.3 Installations ou centrales électriques photovoltaïques raccordées au réseau :

Un générateur photovoltaïque connecté au réseau n'a pas besoin de stockage d'énergie et élimine donc le maillon le plus problématique (et le plus cher) d'une installation autonome (fig. II.16). C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie. Deux compteurs d'énergie sont nécessaires : un compteur comptabilise l'énergie achetée au fournisseur d'énergie et un autre compteur mesure l'énergie renvoyée sur le réseau électrique lorsque la production dépasse la consommation. Un troisième compteur est ajouté dans le cas où l'énergie produite est injectée en totalité dans le réseau (compteur de non-consommation).

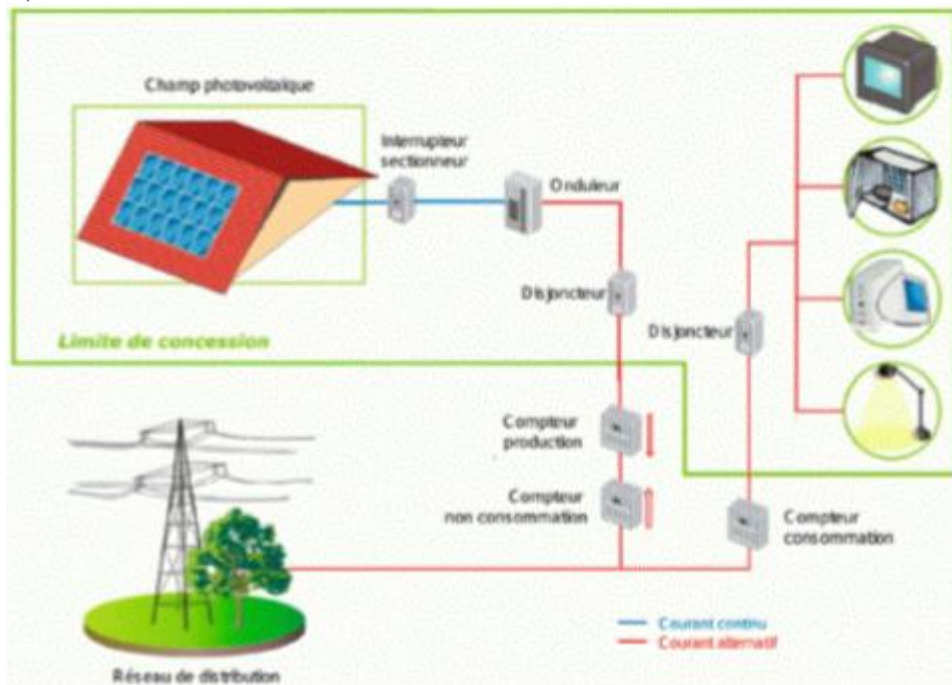


Fig II.12 Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccordée au réseau [20].

II.7.4 Installations ou centrale électriques photovoltaïques hybride :

Il s'agit des systèmes qui regroupent des sources d'énergie de nature différentes, telle une installation éolienne, un générateur diesel ou une centrale de cogénération, en plus un générateur photovoltaïque. Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque seul ne couvre pas toute l'énergie requise [20].

II.8 Étage d'adaptation d'un générateur photovoltaïque à la charge :

La conception d'un étage d'adaptation permet aujourd'hui de relier aisément un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue (DC), avec un rendement de conversion très élevé. En fait, le concept de cet étage correspond à la modélisation des fonctions basiques idéalisées d'un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC). Ce concept est nommé

ainsi à cause des liens que le convertisseur crée entre ses quatre grandeurs électriques sur les ports d'entrée et de sortie qui sont ses courants et ses tensions d'entrée et de sortie [21].

II.8.1 Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation DC-DC.

La Figure II.17 présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie[22]. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stock d'énergie ou une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension (ballast...). Cet étage d'adaptation dispose d'une commande Maximum Power Point Tracking(MPPT) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé.

De nombreuses recherches sur les commandes MPPT ont été effectuées afin de trouver un système optimal permettant une recherche de PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque. Les commandes MPPT développées au LAAS, par exemple, sont toutes basées sur une commande extrême de type Perturbé & Observe (P&O). Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes de commandes extrêmes présentant plus ou moins de précisions. A partir de l'évaluation ou de la mesure de la puissance fournie par le générateur, ces commandes utilisent le rapport cyclique du convertisseur de puissance (CS) pour appliquer une action de contrôle adéquate sur l'étage et pour suivre l'évolution au cours du temps du PPM. Un grand nombre de ces commandes ont l'avantage d'être précises et d'avoir une grande rapidité de réaction mais souffrent encore d'un manque d'optimisation de leur algorithme parfois trop complexe et consommant alors trop d'énergie.

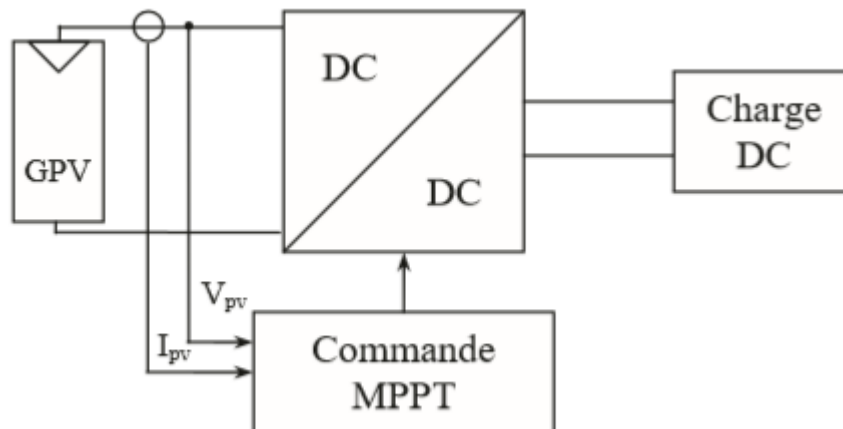


Fig. II.13 Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC Contrôlé par une commande MPPT sur charge DC [22].

II.8.2. Convertisseur DC-DC pour les systèmes d'énergie solaire :

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé [23].

Il existe plusieurs types des Hacheurs DC-DC (Tableau II.1). Parmi lesquels, on présente le principe des trois types des convertisseurs à découpage (dévolteur, survolteur et mixte),

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 [24].

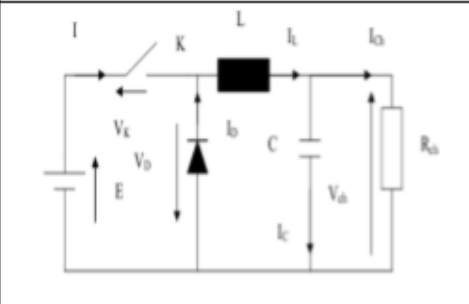
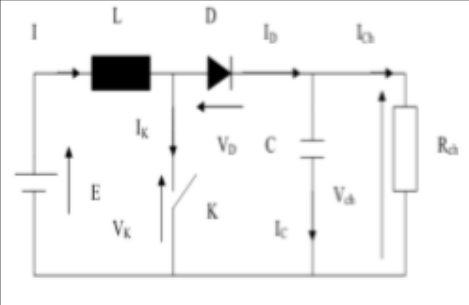
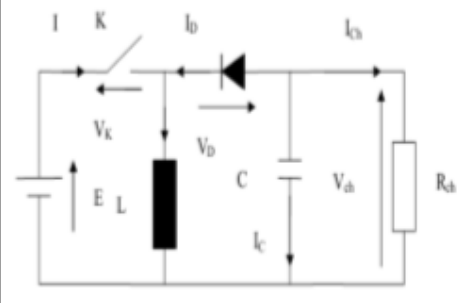
Type d'hacheur	Schéma équivalent	Rapport de transformation	Application
Hacheur série		α	Convertie sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure
Hacheur parallèle		$\frac{1}{1 - \alpha}$	Convertie une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur
Hacheur série-parallèle		$\frac{-\alpha}{1 - \alpha}$	Lorsque la machine fonctionne en moteur lorsqu'elle est alimentée par le hacheur série ou en génératrice La machine fonctionne en génératrice

Tableau II.1 Comparaison les principaux convertisseurs DC-DC [24].

II.8.3 Principe de fonctionnement de MPPT :

Un MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclaircissement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant [25].

II.8.4.Méthode de perturbation et observation:

Le principe de la commande MPPT de type P&O consiste à perturber (changer légèrement) la tension du générateur PV (V_{pv}) et ensuite à observer la variation de puissance (P_{pv}) qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure II.19, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se retrouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM (à droite du PPM) [26].

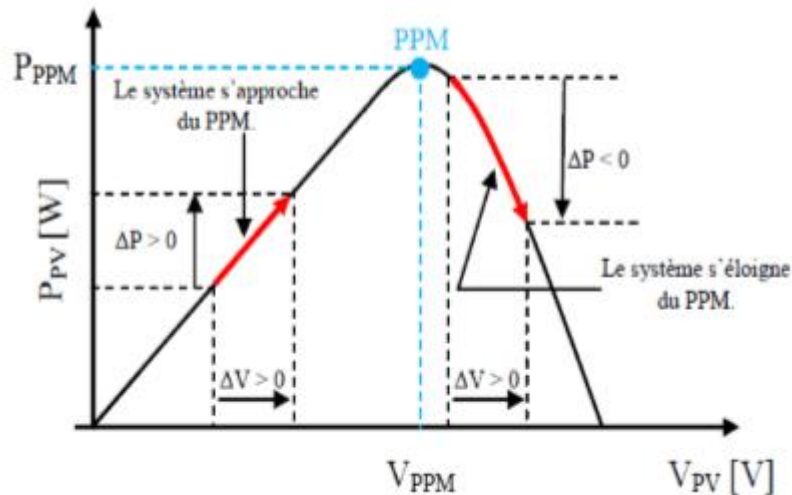


Fig. II.14 Caractéristique P-V selon la méthode P&O [26].

II.9 La connexion GPV-charge via [un étage d'adaptation continu alternatif

Les applications photovoltaïques les plus valorisantes actuellement sont les installations PV destinées à alimenter le réseau électrique public. Il existe différentes topologies de gestion de ces installations. Néanmoins, toutes ces approches reposent sur un GPV raccordé au réseau par le biais d'onduleurs qui transfèrent et mettent en forme l'énergie solaire électrique [22]. Les progrès effectués ces dernières années dans le développement des onduleurs dédiés aux photovoltaïques ont permis de faire évoluer grandement ces systèmes de gestion. Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer la puissance continue (DC) générée par les panneaux solaires en puissance alternative sous forme d'une tension sinusoïdale de fréquence souhaitée (par ex. 230V/400V - 50Hz) mais ils exploitent également la puissance délivrée par le GPV en le forçant à fonctionner à son point de puissance maximum. De plus, ils assurent une surveillance fiable du réseau pour protéger ce dernier contre les pannes et interrompre l'alimentation en cas de problèmes survenant soit du réseau soit de l'installation. Actuellement, il existe principalement trois architectures d'onduleurs donnant de bonnes solutions techniques : l'onduleur central, les onduleurs strings et les onduleurs intégrés aux panneaux. Leurs propriétés sont décrites brièvement ci-dessous.

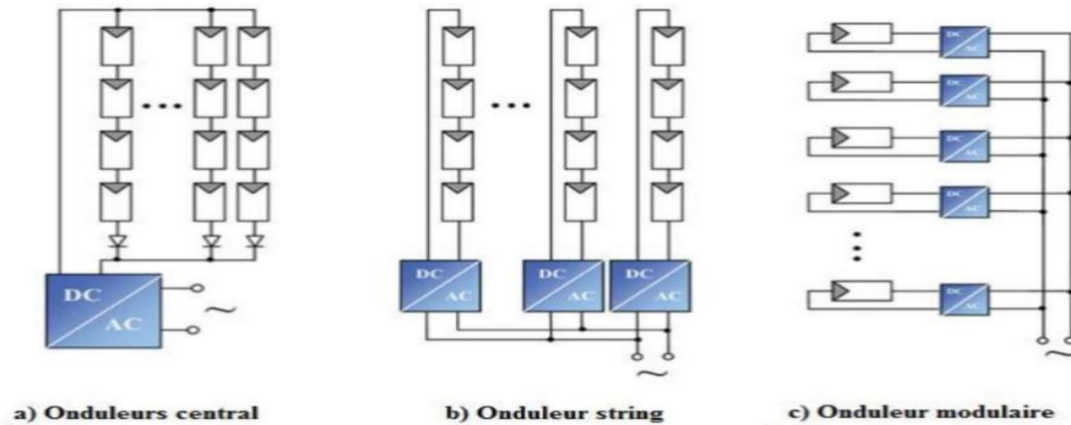


Fig. II.15 : Les différents types d'onduleur [22].

II.9.1. L'onduleur central

Dans le cas d'onduleur central, les divers panneaux solaires pour une grande installation (>10kW) sont montés en rangées pour former une chaîne (String en anglais). Cette chaîne est couplée en parallèle, avec des diodes anti-retours, à d'autres. Le générateur PV de forte puissance ainsi structuré est relié du côté DC à un seul onduleur. Cet onduleur central présente une grande efficacité énergétique à des coûts réduits. La fonction principale de cet appareil est de créer une tension alternative à partir d'une tension continue la plus compatible avec le réseau et d'examiner en permanence la présence ou non du réseau pour autoriser l'injection du courant. La structure classique de l'onduleur est souvent un circuit en pont permettant de relier chacun des deux pôles d'entrée à chacun des deux pôles de sortie par le biais d'interrupteurs de puissance.

Le couplage direct des installations PV avec des onduleurs sans transformateur gagne en importance. En effet, ils sont peu onéreux et offrent un rendement énergétique très intéressant (entre 95% et 97% pour les fortes puissances). Pour pouvoir alimenter le réseau, la tension d'entrée doit toujours dépasser la tension crête de la tension réseau redressée. Soit, pour une valeur de tension efficace réseau de 250V, une source de tension minimale de 354V est nécessaire pour pouvoir injecter un courant sinusoïdal dans le réseau. Par conséquent, un panneau mal adapté ou encore un ombrage partiel porte préjudice à une exploitation optimale de chaque chaîne PV et entraîne une réduction du rendement énergétique. L'onduleur central possède de plus en plus souvent au moins un système de contrôle MPPT lui permettant de fonctionner à son PPM. Cela marche parfaitement tant que les panneaux sont identiques et qu'ils fonctionnent sous un ensoleillement homogène. Mais lorsque les caractéristiques électriques entre les panneaux diffèrent, dues à des ombrages, des salissures, au vieillissement ou au stress, la commande MPPT devient incertaine et le champ photovoltaïque ne produit pas autant qu'il le pourrait. En outre, la fiabilité de l'installation est limitée parce qu'elle dépend d'un seul onduleur. Ainsi, lorsqu'une panne de l'onduleur central se produit, elle entraîne l'arrêt complet de l'installation et donc de la production.

II.9.2 Les onduleurs strings

De même que pour l'onduleur central, le champ PV est, ici aussi constitué de strings (chaînes). Chaque string est toutefois relié à un onduleur. Chaque string peut ainsi fonctionner à son PPM. Cette technologie réduit considérablement le risque de problèmes d'adaptation ainsi que

les pertes dues aux effets d'ombrage, tout en éliminant celles occasionnées par les diodes anti-retours et un câblage prolongé vers le générateur DC. Ces propriétés techniques avantageuses accroissent la fiabilité de l'installation ainsi que sa production énergétique. Mais il faut prendre en compte l'augmentation du nombre d'onduleurs de moyenne puissance disposant de rendement compris entre 92% et 96% nécessaires pour calculer le surcoût d'une telle architecture par rapport à la précédente.

II.9.3 Les onduleurs intégrés aux panneaux PV

Chaque panneau dispose ici de son propre onduleur, ce qui permet théoriquement d'éviter toutes pertes liées à la différence de puissance entre chaque module quelle que soit l'origine du défaut. Le rendement des onduleurs intégrés aux panneaux reste cependant en-deçà de celui de l'onduleur string à cause de la grande différence des tensions entre les GPV et la charge. De plus, les onduleurs intégrés aux panneaux induisent des coûts de câblage supplémentaires du côté AC, étant donné que chaque panneau de l'installation doit être relié au réseau 230V. Le nombre nettement supérieur d'onduleurs intégrés aux panneaux nécessaires dans cette architecture entraîne un travail de couplage nettement plus conséquent. Ce concept ne s'applique donc généralement qu'aux installations PV d'une puissance modeste allant de 50 W à 400 W. Récemment, un nouveau concept hybride est apparu, il se base sur les avantages et les inconvénients de chacune des méthodes citées précédemment. Habituellement, les onduleurs strings et intégrés sont reconnus pour leur meilleure réponse aux variations d'ensoleillement et aux inhomogénéités lumineuses mais aussi pour leur facilité d'installation. D'autre part, l'onduleur central est souvent moins cher en termes d'équipement électronique qui est, somme toute, très modeste, il dispose d'un meilleur rendement et est, en plus, plus fiable.

Tableau II.2 : Caractéristiques techniques des différents systèmes de configuration

	Onduleur Central	Onduleur String	Onduleur Intégré
Tension PV	340-800V	150-800V	17-90V
Pertes DC (Ohmique)	~1-5% en fonction de la tension et de la distance	~1% en fonction de la tension et de la distance	Négligeable
η_{CONV}	95-97%	92-96%	87-93%
Maintenance et réparation	Simple	Difficile (recherche dysfonctionnement)	Difficile (recherche dysfonctionnement)

Conclusion :

Dans ce chapitre, le système photovoltaïque et ses composants, ainsi que différents types du hacheur et onduleur et la commande MPPT ont été étudiés. L'étape suivante du travail consiste à choisir le modèle mathématique d'un PV et procéder à une simulation environnement MATLAB/Simulink.

Chapitre III :

Modélisation et Simulation
d'un Module Photovoltaïque

Introduction :

La modélisation des modules photovoltaïques est une tâche importante pour analyser, évaluer et optimiser en vue de la conception des systèmes photovoltaïques. Ce chapitre décrit les différents circuits électriques équivalents (modèles) du générateur photovoltaïque tels que le modèle idéal et le modèle avec pertes ohmiques (réel). Un modèle de simulation du système photovoltaïque à base du logiciel MATLAB/Simulink est effectué.

III.1. Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque :

III.1.1 Cas d'une cellule idéale :

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'air de transition p-n de la cellule PV (fig. III.1). Si l'on connecte une charge résistive aux bornes du générateur photovoltaïque, ce dernier y débite une part de courant I et le reste, le courant I_d , dans la diode. [27]

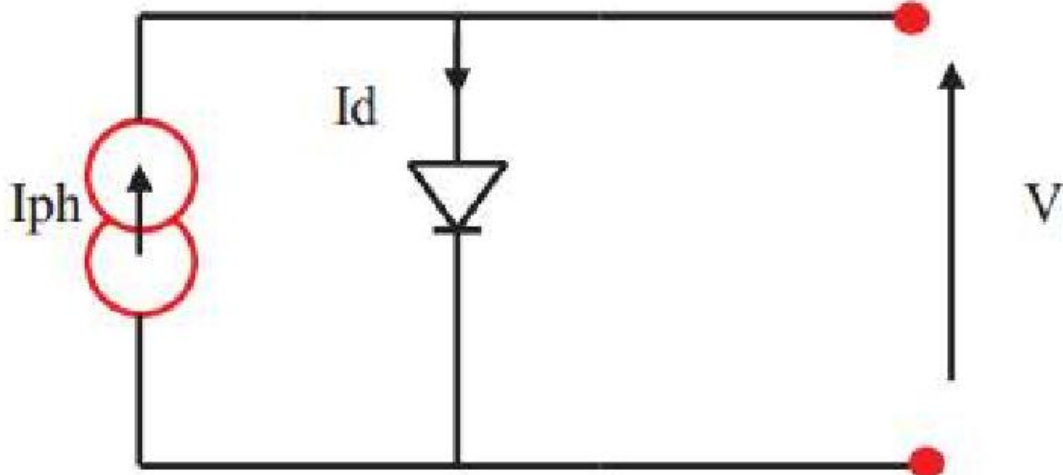


Fig. III.1 : Schéma équivalent d'une cellule idéale

- Les équations retenues de ce modèle sont:

$$I_{pv} = I_d + I_{ph}$$

Où :

- I_{pv} : courant de cellule PV
- I_d : courant de diode
- I_{ph} : courant de générateur photovoltaïque

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

$$I_{ph} = I_{sc} = E / E_{ref}$$

Où :

- E: L'éclairement absorbé par la cellule.
- E_{ref} : L'éclairement de référence (1000 w/m²).

$$I_d = I_0 (\exp (V_d/V_t - 1))$$

Où :

- I₀ : Courant de saturation inverse de la diode.
- V_d : tension de diode
- V_t : tension thermique

$$V_t = NKT / q$$

Où

- V_t: Tension thermique.
- N : Facteur d'idéalité de la photopile.
- K : Constant de Boltzmann (1,38.10⁻²³J/K).
- q : Charge de l'électron (1,6.10⁻¹⁹C).

III.1.2. Cas d'une cellule réelle :

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté par la figure (III.2). Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_{sh}) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s) [28].

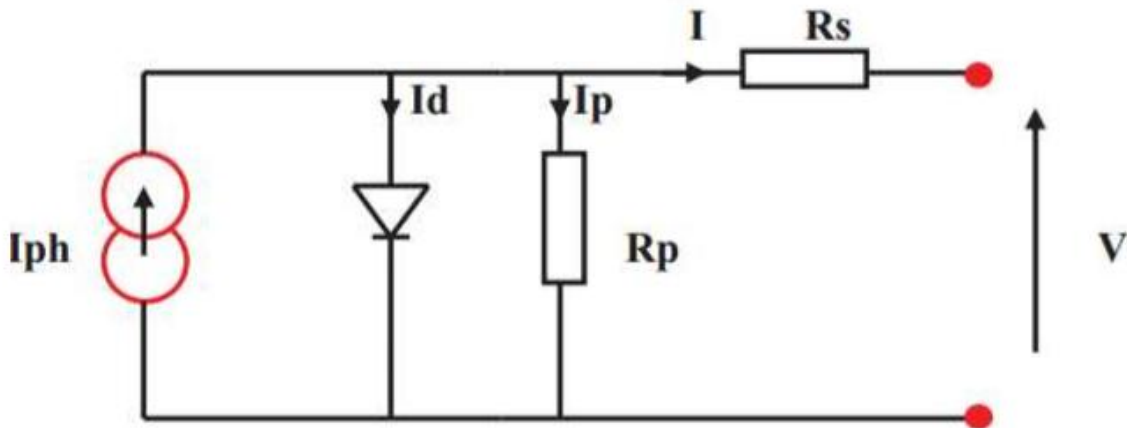


Fig. III.2 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle [28].

Dans ce travail, le modèle mathématique du module solaire utilisé est à exponentiel simple. Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque est de la forme mathématique suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p.$$

Où :

- I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque.

- I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).
- I_d : Le courant circulant dans la diode.

$$I_d = I_0 (\exp (V_d/V_t - 1))$$

$$I_0 = I_{0r} ((T/T_n)^3 \exp (E_g/BK (1/T_n - 1/T)) - 1).$$

Où:

- I_{0r} : le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence
- T_n : l'éclairement de référence.
- T : Température de la jonction des cellules PV [°K].
- T_n : Température de référence des cellules PV [°K].
- B : facteur d'idéalité de la jonction E_g : Énergie de gap [ev].
- V_{pv} : La tension de sortie.
- I_p : Le courant circulant dans la résistance R_p .
- R_p : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.
- R_s : résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi que les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules.

Le courant I_{pv} :

$$I = I_{ph} - I_0 [\exp ((V_{pv} + I_{pv}.R_s)/v_t) - 1] - (V_{pv} + I_{pv}.R_s)/R_p$$

III.2 Hacheur survolteur (boost) : modélisation et simulation

III.2.1. Principe de fonctionnement et circuit équivalent :

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension, abaisseur de courant. Le schéma (fig. III.3) représente le circuit électrique du Boost. Durant le temps de conduction, le transistor k est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, au fur et à mesure elle emmagasine de l'énergie. Pendant l'intervalle du blocage Le transistor s'ouvre et l'inductance L délivre le courant I_L et ainsi génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge Z à travers la diode D (fig. III.4).

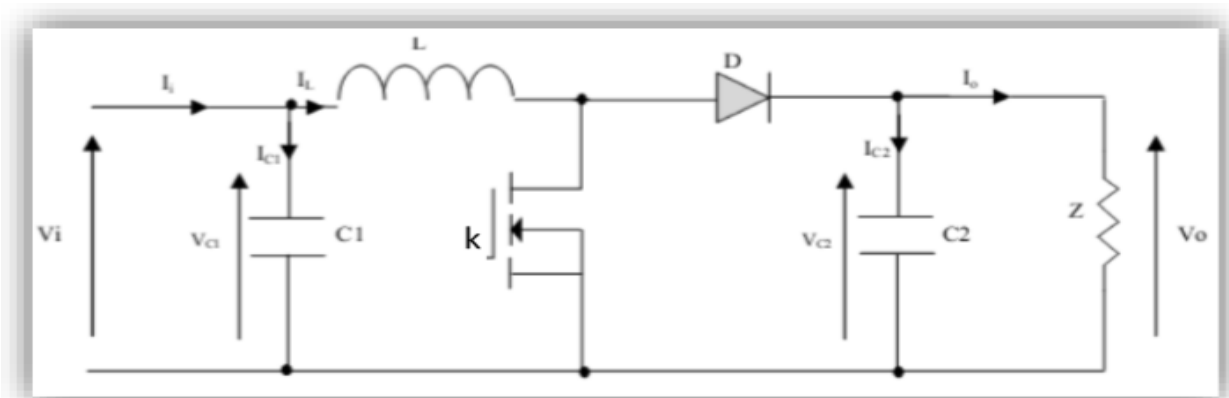


Fig. III.3 Circuit électrique de l'hacheurBoost [28].

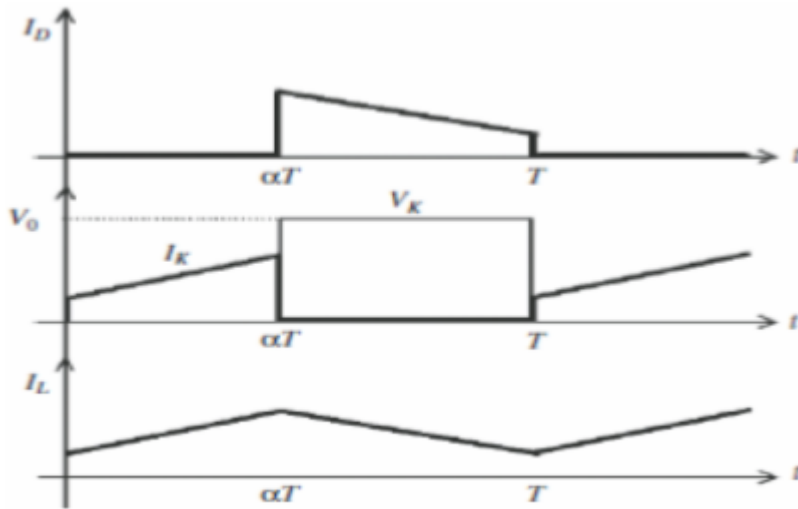


Fig. III.4 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

b) Modèle mathématique équivalent :

Pour obtenir le modèle mathématique du convertisseur, il faut l'étudier dans les deux phases de fonctionnement (k fermé, et k ouvert). Les figures (III.5, III.6) donnent les équations suivantes : Pour la première période αT :

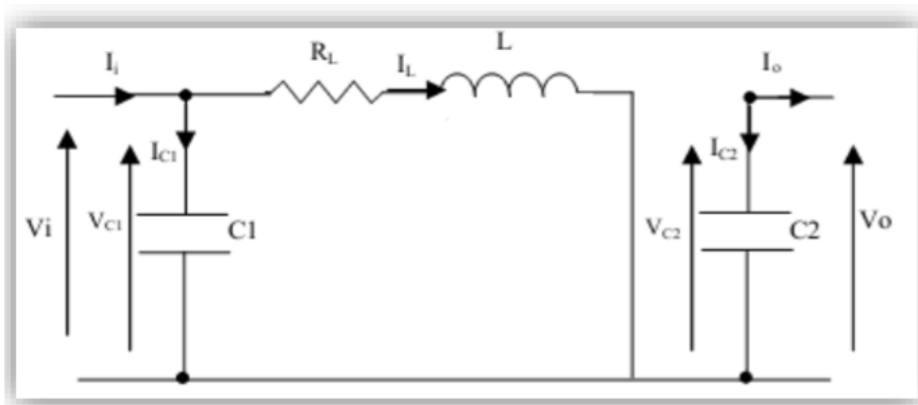


Fig.III.5 Circuit équivalent du Boost lorsque S fermé [28].

$$\begin{cases} i_{c1} = C_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_l \\ i_{c2} = C_2 \frac{dv_0}{dt} = -i_{l0} \\ v_l = L \frac{di_l}{dt} = -v_i \end{cases}$$

Pour la deuxième période $(1-\alpha) T$:

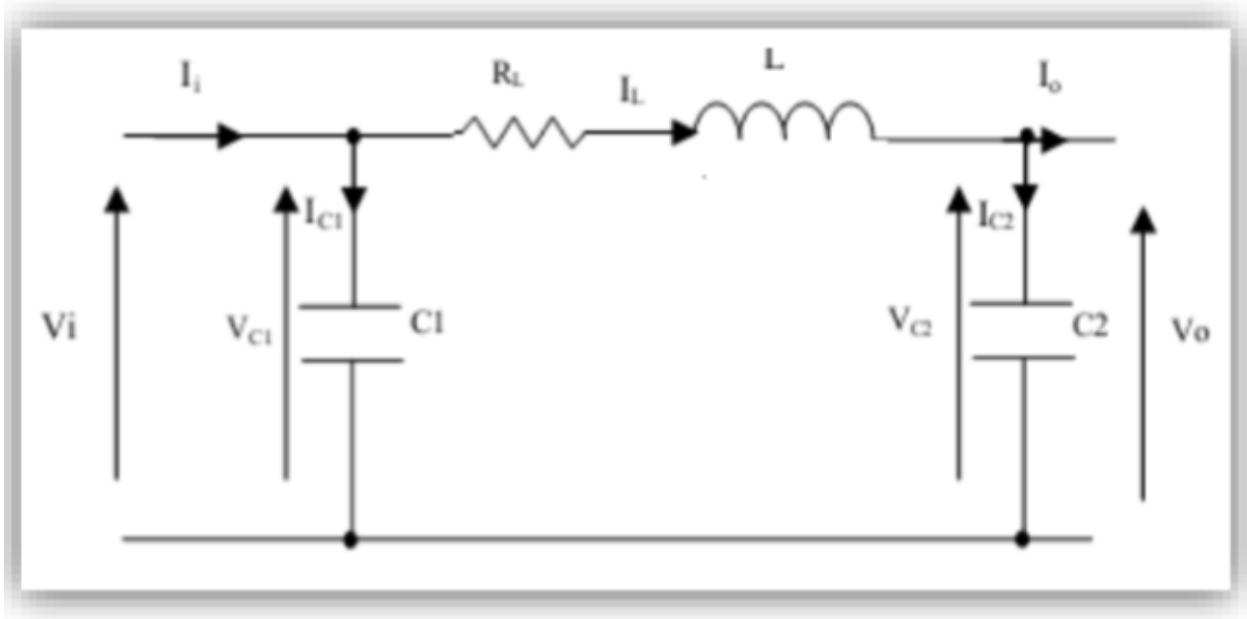


Fig.III.6 Circuit équivalent du Boost lorsque S ouvert [28].

$$\begin{cases} i_{c1} = C_1 \frac{d_{v_i}}{dt} = i_i - i_l \\ i_{c2} = C_2 \frac{d_{v_0}}{dt} = i_l - i_{l0} \\ v_l = L \frac{d_{i_l}}{dt} = v_i - v_0 \end{cases}$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, on obtient la modélisation dynamique du Boost :

$$\begin{cases} i_l = i_i - c_1 \frac{d_{v_i}}{dt} \\ i_0 = (1 - \alpha)i_l - c_2 \frac{d_{v_0}}{dt} \\ v_i = (1 - \alpha)v_0 - L \frac{d_{i_l}}{dt} \end{cases}$$

Où :

- i_{c1} : courant de condensateur 1
- i_{c2} : courant de condensateur 2
- i_i : courant de circuit
- i_l : courant de l'inductance
- i_{l0} : courant aux bornes I_i I_0
- v_i : tension de circuit entre I_i et c_1
- v_l : tension de l'inductance
- v_0 : tension de circuit entre I_0 et c_2

- L : l'inductance
- α : la période (angle T)

c) Conception d'un hacheur Boost :

$$L = \frac{v_i \cdot \alpha}{f \cdot \Delta i_l}$$

$$C_2 = \frac{v_i \cdot \alpha}{f \cdot R_{ch} \cdot \Delta v_0 (1 - \alpha)}$$

$$C_1 = \frac{i_i - i_l}{2 \cdot \Delta v_i}$$

Où :

- C_1 : courant de condensateur 1
- C_2 : courant de condensateur 2
- v_i : tension de circuit entre I_i et c_1
- i_i : courant de circuit
- i_l : courant de l'inductance
- f : constant
- R_{ch} : Resistance de charge
- L : l'inductance
- α : la période (angle T)
- Δi_l : différence de courant de L
- Δv_0 : différence de la tension de V_0
- Δv_i : différence de la tension de V_i

d) Simulation:

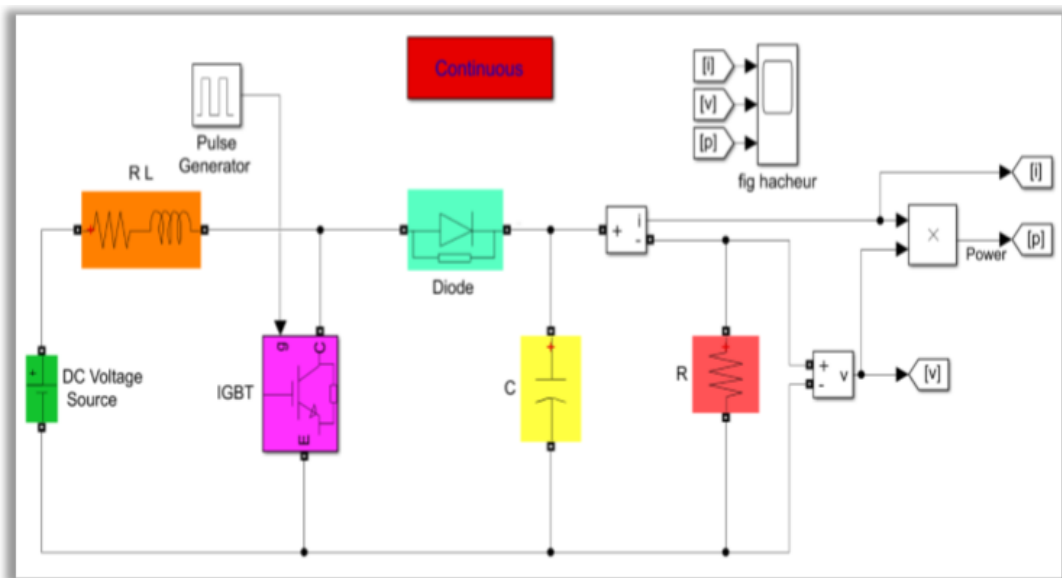
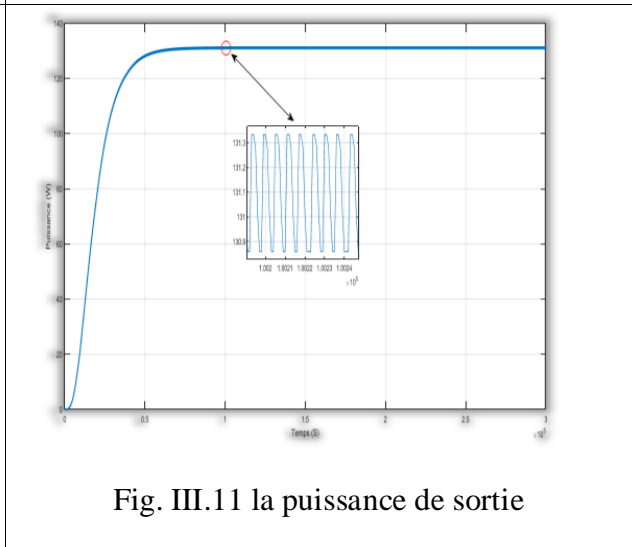
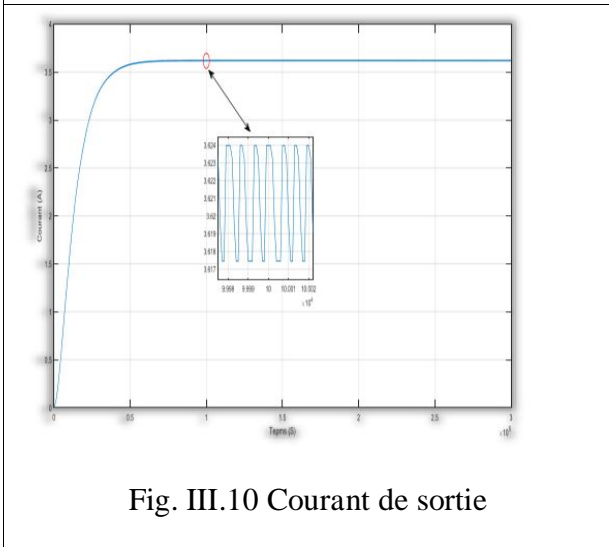
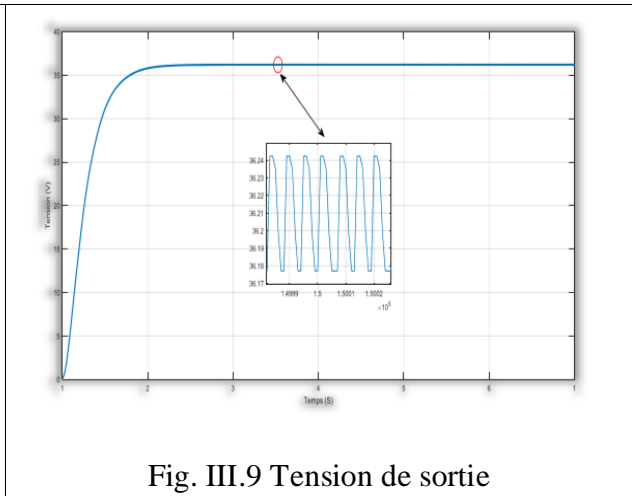
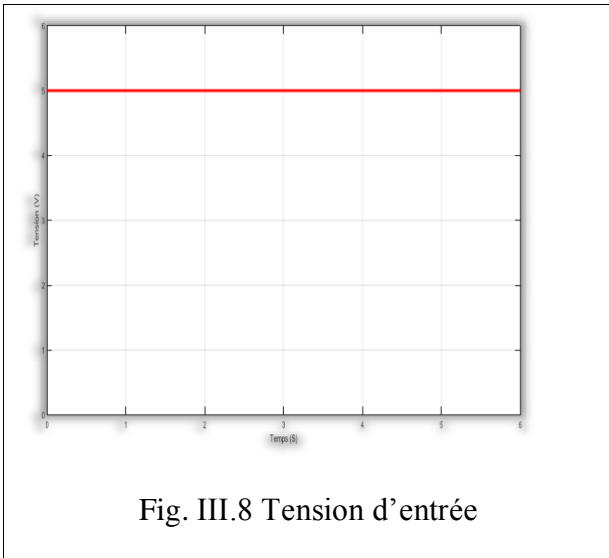


Fig. III.7 Schéma bloc d'un hacheur boost.



Les figures (III.9, III.10 et III.11) montrent que les valeurs de tension, courant et puissance de sortie du hacheur est supérieure à la source de tension continu car la commande impose un rapport cyclique α .

III.2.2 Simulation du système PV-Hacheur avec la commande MPPT :

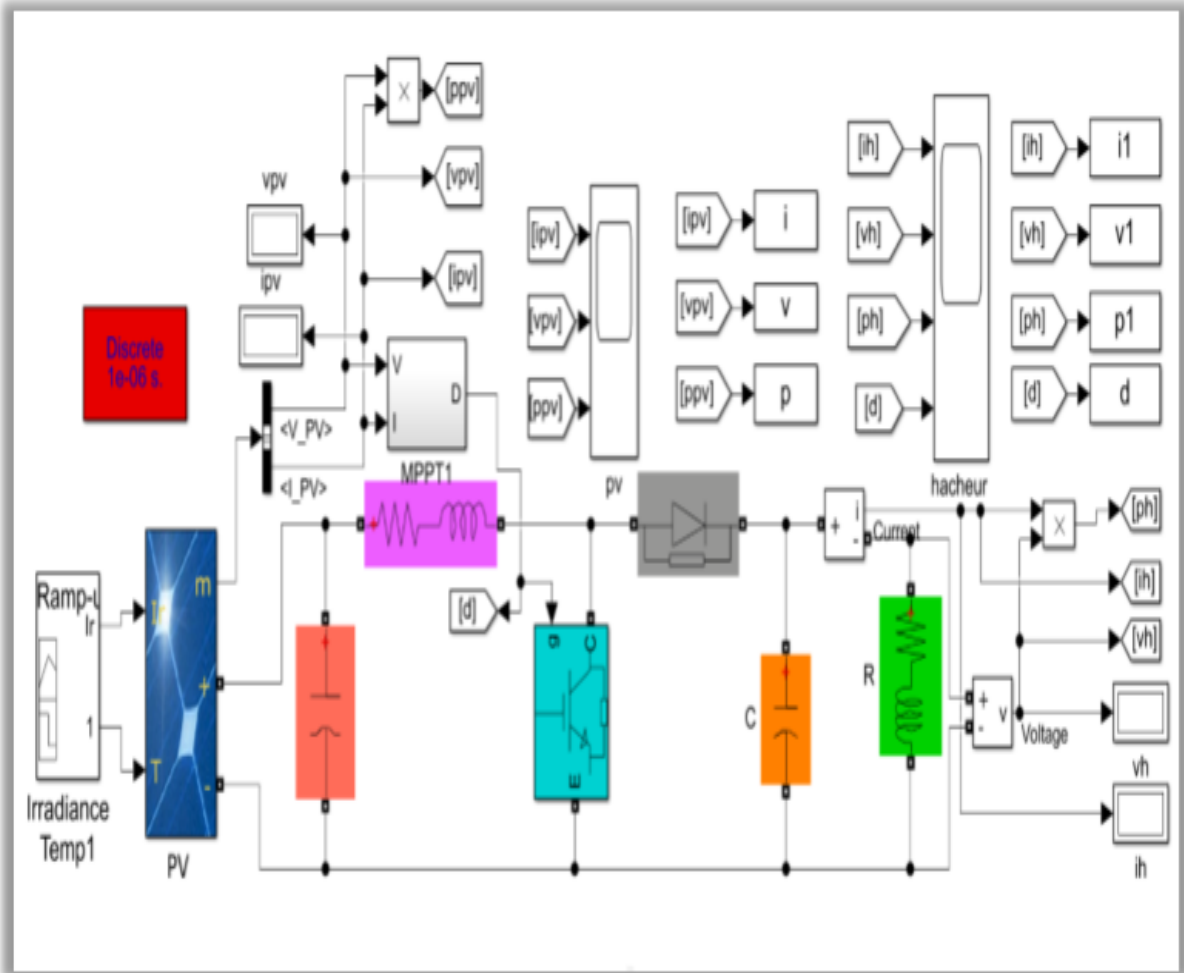


Fig. III.12 Schéma de simulation de panneaux photovoltaïque avec un hacheur boost.

III.2.2.1 Modèle avec irradiation et température constante:

($G=1000\text{w/m}^2$, $T=25\text{c}^\circ$)Sortie de photovoltaïque :

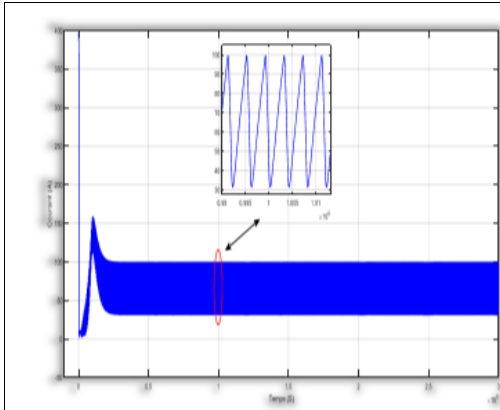


Fig. III.13 variation temporele du courant.

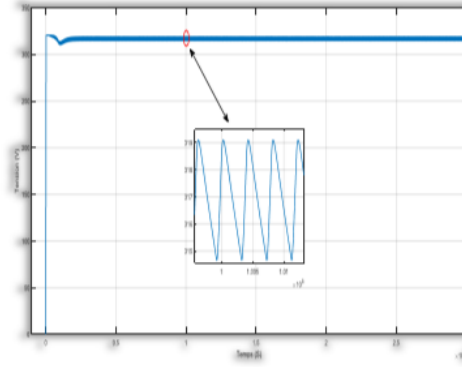


Fig. III.14 variation temporele de la tension.

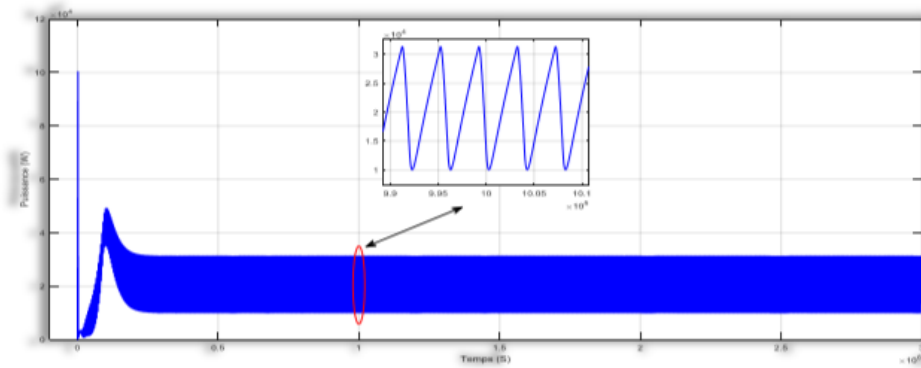


Fig. III.15 variation temporele de la puissance.

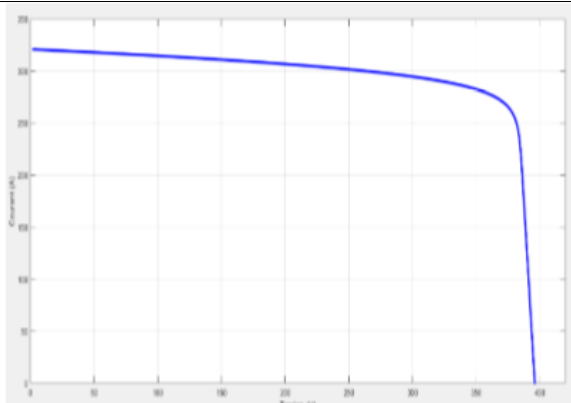


Fig. III.16 Caractéristique I-V

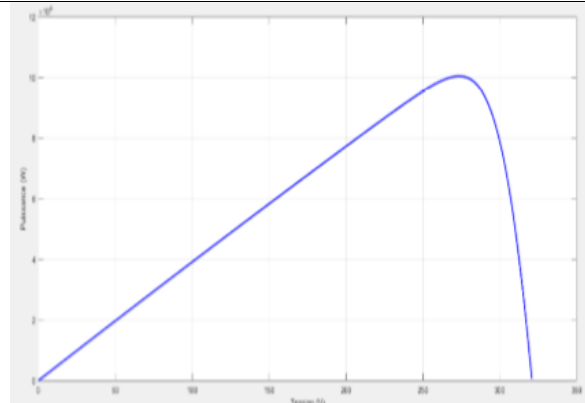


Fig. III.17 Caractéristique P-V

D'après la figure (III.14), au départ la tension de PV fait un bond puis se stabilise à la valeur désirée. La figure (III.13) indique qu'au départ le courant prend sa valeur de court-circuit, ensuite il retourne à la valeur nominale. La figure (III.15) montre que le générateur PV fonction en puissance maximale.

Sortie du hacheur :

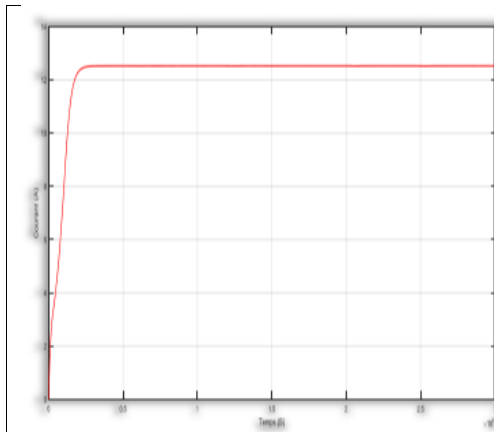


Fig. III.18 variation temporele du courant.

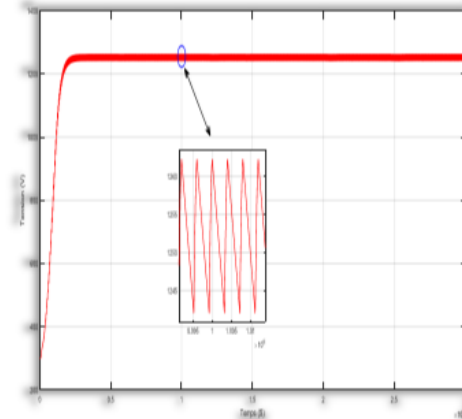


Fig.III.19 variation temporele de la tension

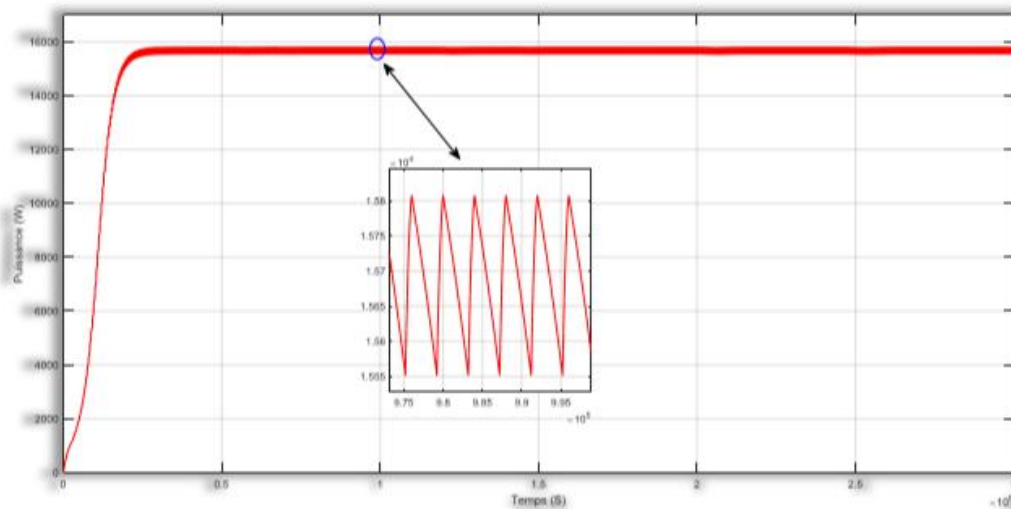


Fig. III .20 variation temporele de la puissance.

Les figures (III.18, III.19 et III.20) montre que les valeurs de tension, courant et puissance de sortie du hacheur sont inférieure à celles de PV car la commande MPPT impose un rapport cyclique $0.4 > D$.

III.2.2.2 Modèle avec température variable et irradiation variable :

a) Température variable:

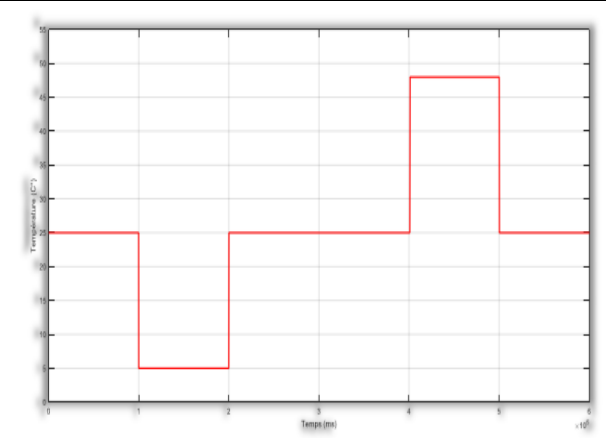


Fig.III.21 La variation de la température.

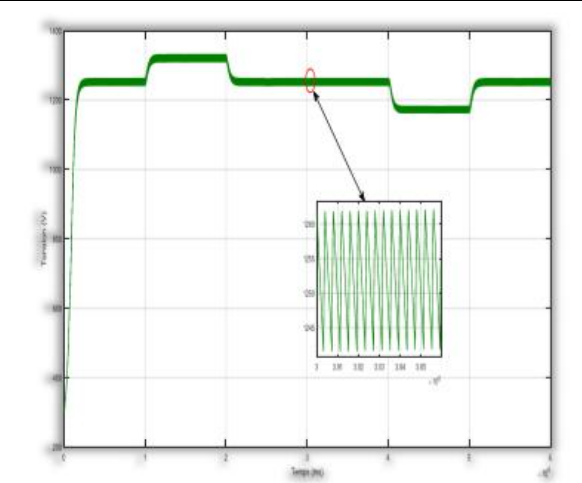


Fig. III .22Tension de sortie

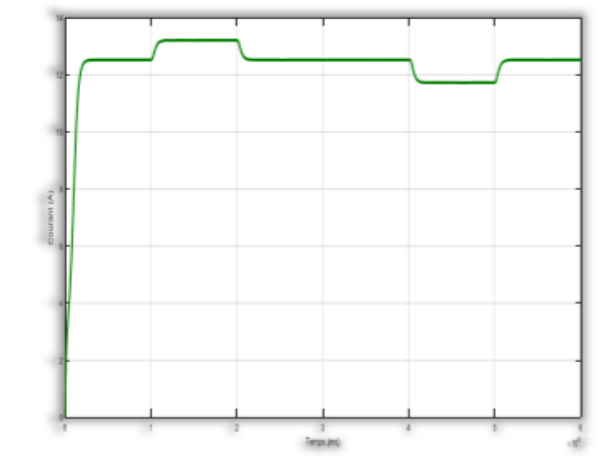


Fig. III.23 Courant de sortie

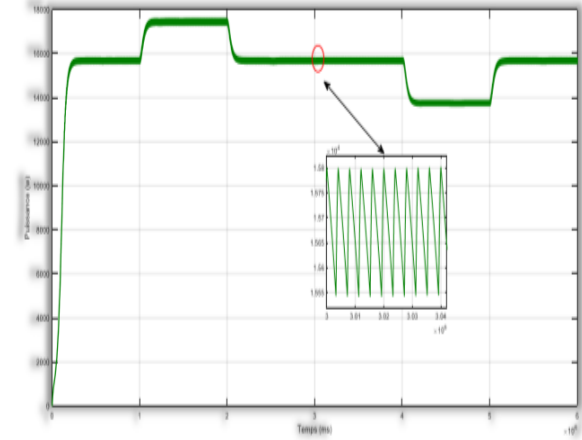


Fig.III.24 Puissance de sortie

b) Irradiation variable:

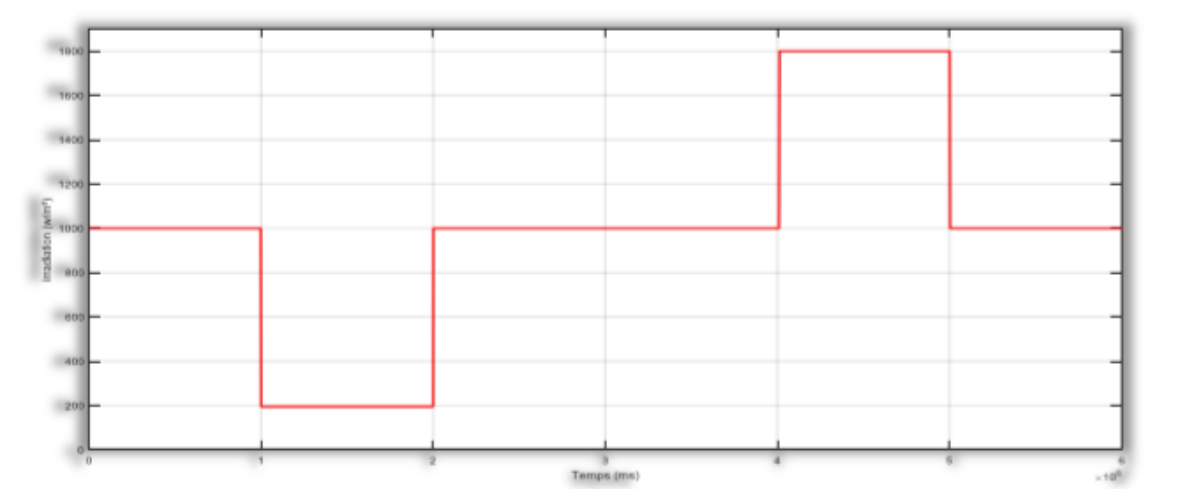


Fig. III.25 La variation de l'irradiation.

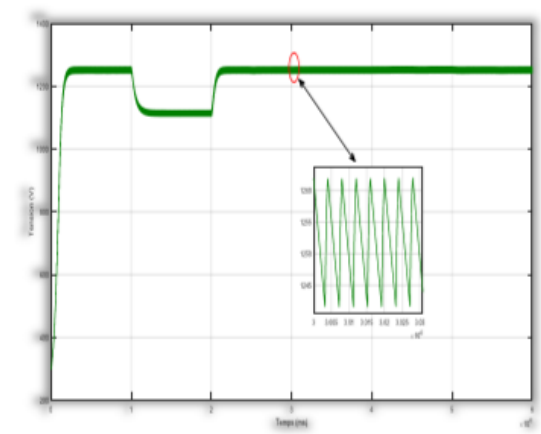


Fig. III.26 Tension de sortie

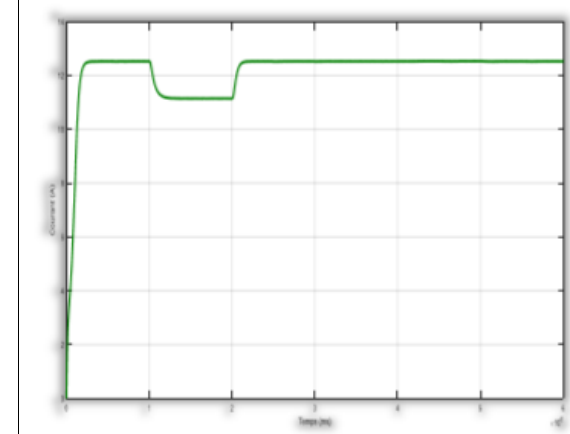


Fig. III.27 Courant de sortie

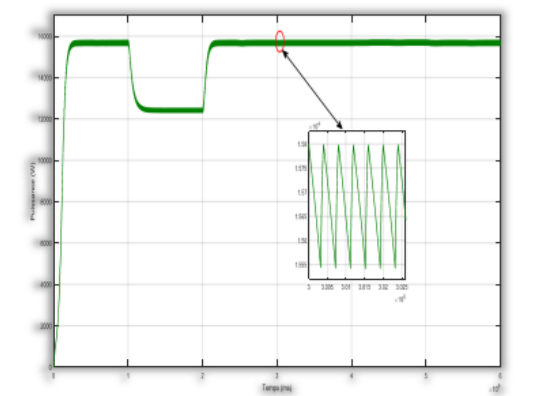


Fig. III.28 Puissance de sortie

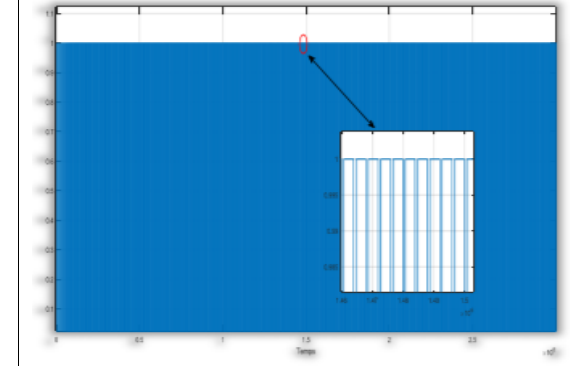


Fig. III.29 Signal de la gâchette d'IGBT

Les figures (III.22, III.23 et III.24) montrent qu'à 4ms la température diminue, de 25c° à 5c° la puissance augmente autant que toutes les autres variables, or lorsque la température augmente le contraire s'observe.

Les figures (III.26, III.27 et III.28) montrent que de 0s jusqu'à 0.5s toutes les grandeurs P, I et V augmentent jusqu'à la valeur maximale à t= 0.5s ; l'irradiation diminue de 1000w/m² à 200w/m², la puissance, courant et la tension diminuent par rapport à cette variation. Après 2s, lorsque la variation s'annule les courbes reprennent leurs valeurs maximales.

III.3 Modélisation et simulation d'un Onduleur :

III.3.1 Structure de l'onduleur :

La Figure III.30 présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandable à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle [29]. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur Cdc de tension Udc [03], ou à deux condensateurs avec un point milieu (Cdc1, Cdc2), [30]. Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (Lr, Rr) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau.

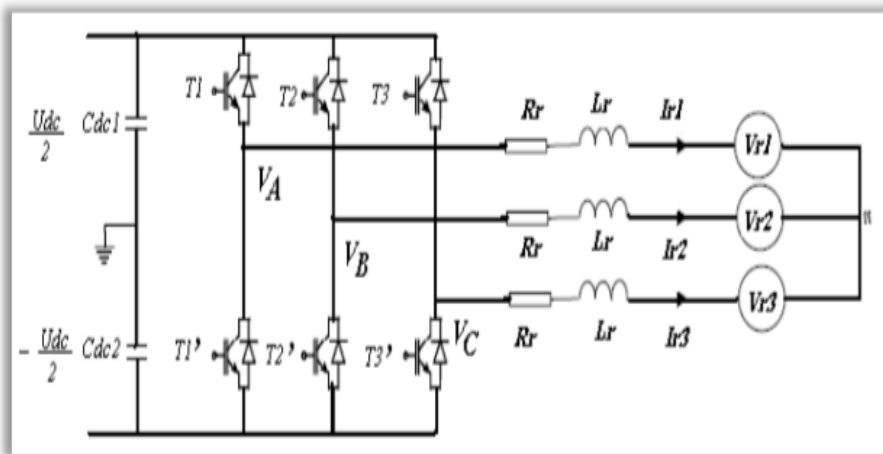


Fig. III .30 Structure d'un onduleur triphasée

En pratique, les deux semi-conducteurs sont commandés par un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations.

Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre. Dans l'hypothèse de

commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte et par conséquent, aucun risque de court-circuiter le condensateur n'est à craindre [31].

L'onduleur peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu - alternatif (DC-AC).

On aura alors :

$$[V_{abc}] = [T][V_{dc}]$$

Avec :

- Tension alternative équilibrée

$$[V_{abc}] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

- Tension continue

$$[V_{DC}] = \begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{B0} \\ V_{C0} \end{bmatrix}$$

- Matrice de transfert de l'onduleur

$$[T] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

L'onduleur a pour objectif de générer à sa sortie, des tensions les plus sinusoïdales possibles. A cet effet, différentes stratégies de modulation ont été proposées.

III.3.2 Commande de l'onduleur

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de telle sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche possible de la tension de référence.

Deux méthodes de commande peuvent être utilisées [32] :

- Commande par hystérésis.

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

Dans ce travail a commandé par modulation de largeur d'impulsion (MLI) a été utilisée.

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou Pulse Width Modulation (PWM) permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Cependant, cette technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques de courant.[33]. La modulation MLI est fortement inspirée des techniques utilisées dans la transmission de l'information. Elle consiste à moduler une onde porteuse triangulaire (issue d'un découpage à fréquence) par une onde modulante sinusoïdale (fréquence) à fréquence beaucoup plus basse [33].

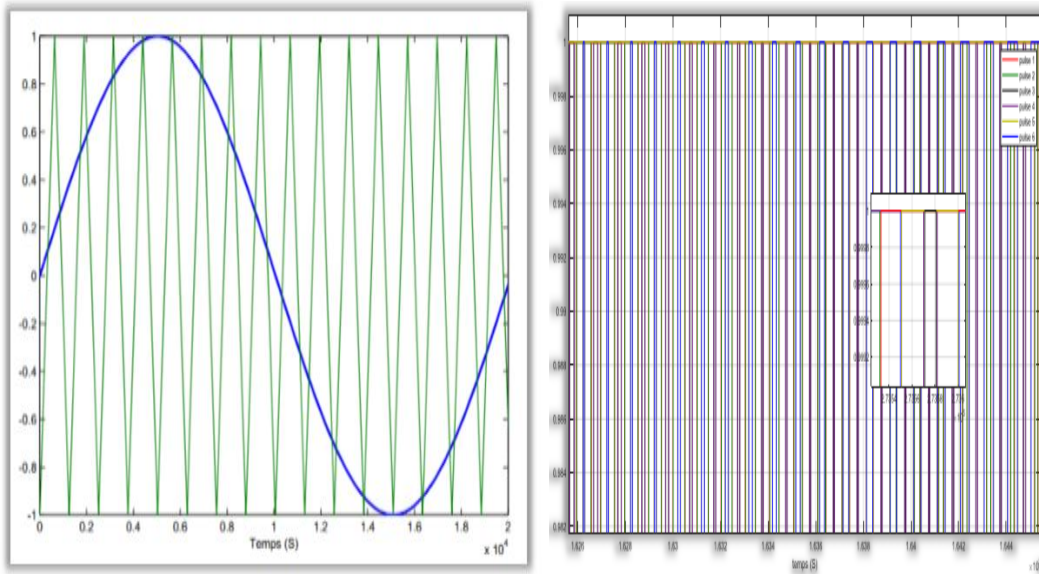


Fig. III .31 : Signal de la commande MLI et les impulsions des interrupteurs.

III.4 Simulation global de PV raccordé au réseau :

III.4.1 Schéma de simulation :

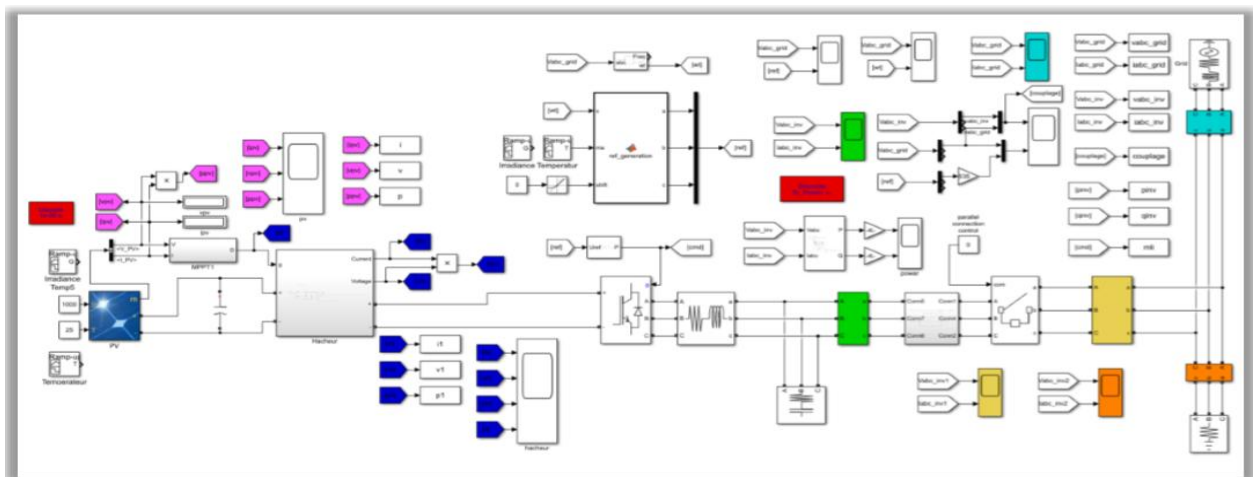


Fig. III.32 Schéma global de simulation d'un panneau photovoltaïque Raccordée au réseau électrique.

III.4.2 Résultats de simulation :

a) *Tension et courant du réseau*

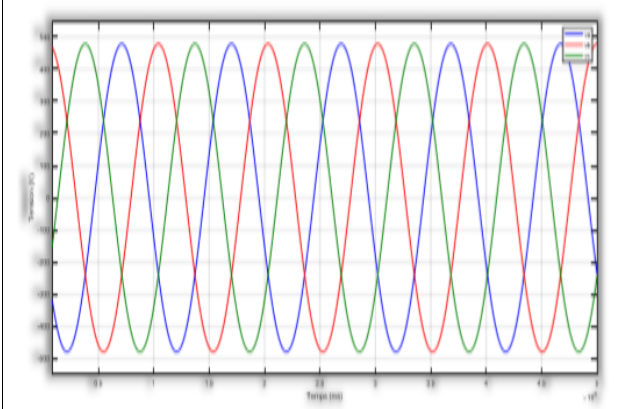


Fig. III.33 Tensions de réseau Vabc.

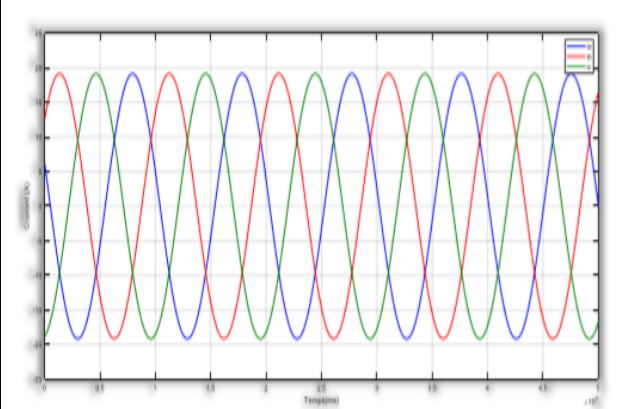


Fig. III.34 Courants du réseau Iabc.

b) *Effet de la variation de l'irradiation :*

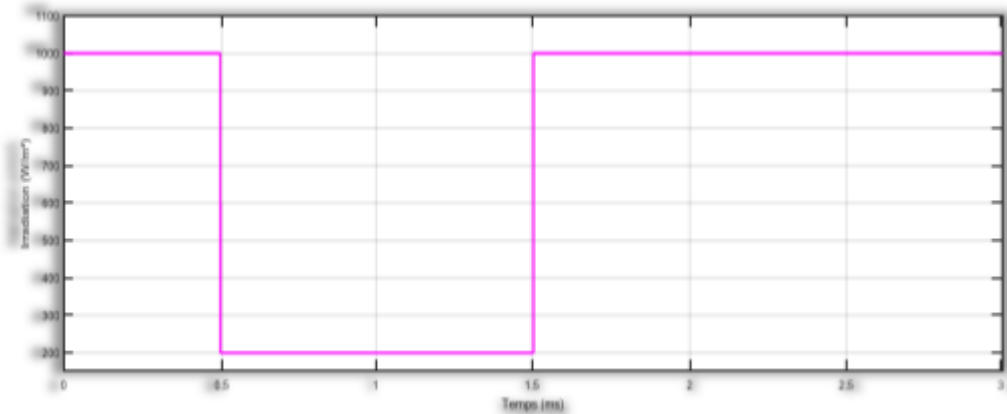
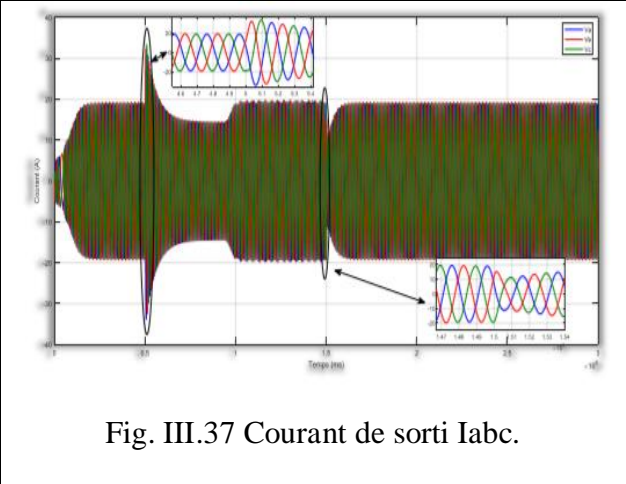
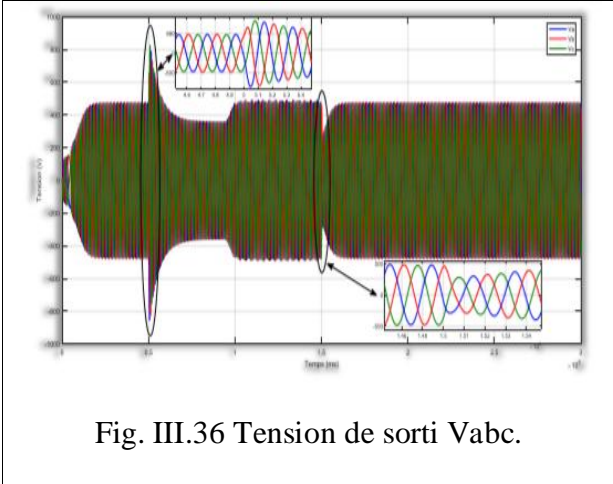


Figure III .35 Variation de l'irradiation G utilisé.

*Coté onduleur:



* Coté charge (couplage réseau – onduleur)

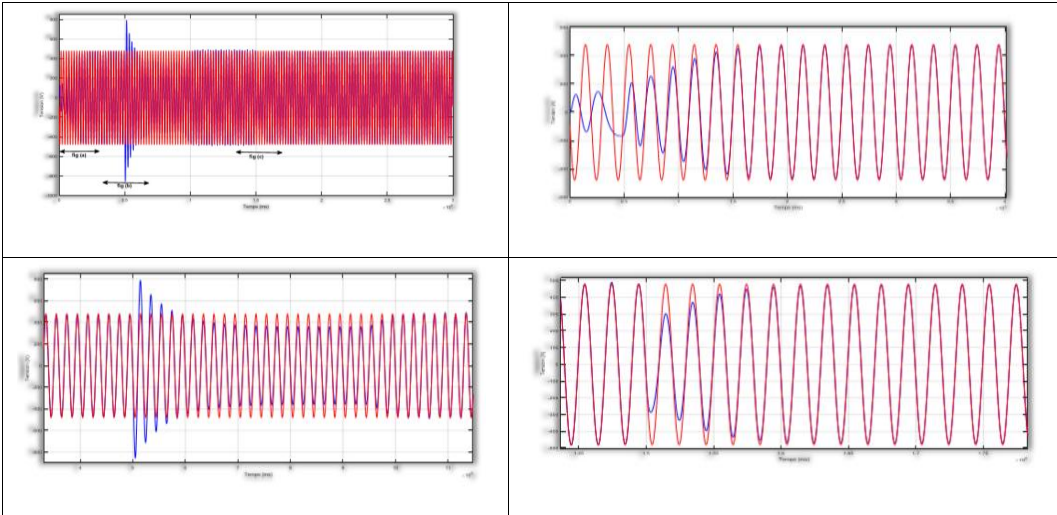


Fig. III .38 Couplage de tension de sortie de l'onduleur avec le réseau.

c) Effet de la variation de température

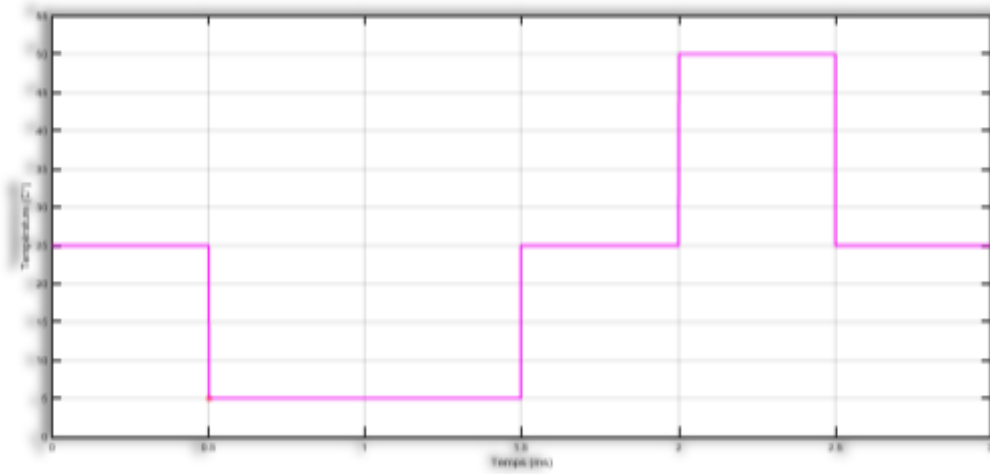


Fig. III.39 Variation de la température utilisée

* Cote onduleur:

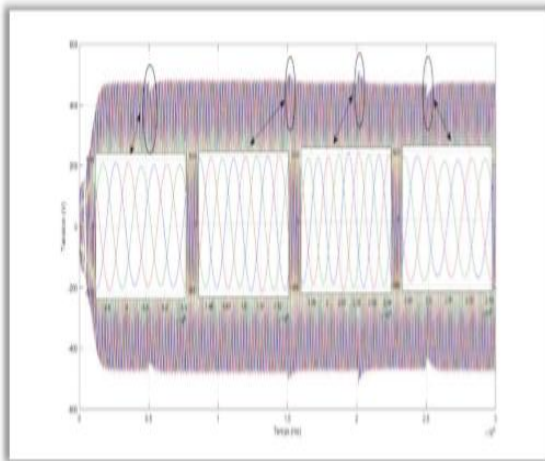


Figure III.40 Tension de sorti de l'onduleur Vabc.

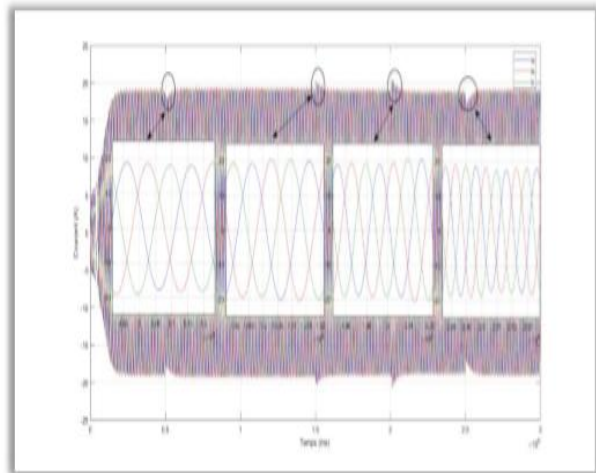


Figure III.41 Courant de sorti de l'onduleur Iabc.

* *Coté charge:*

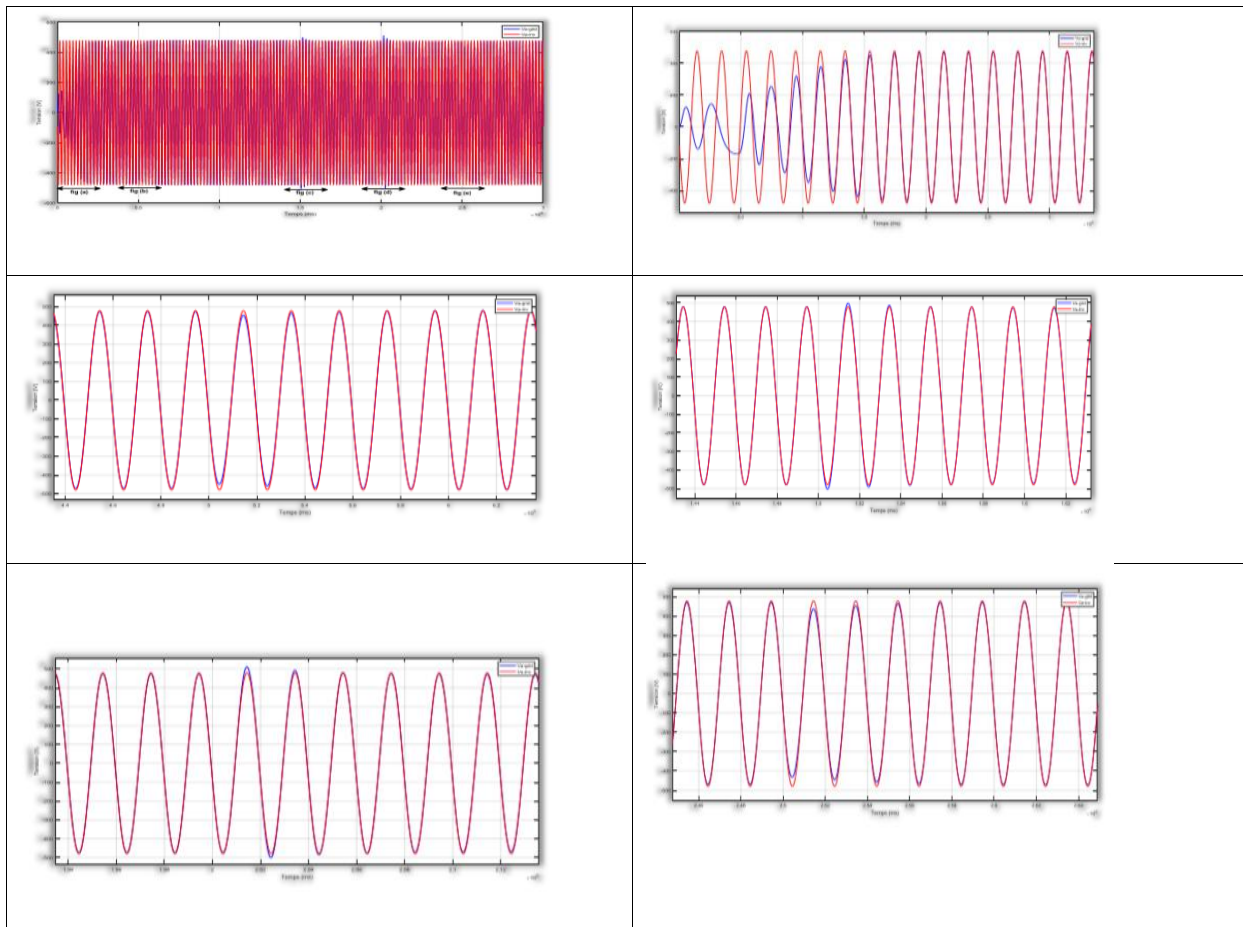


Fig. III .42 Couplage de tension de sortie de l'onduleur avec le réseau.

Conclusion :

Dans ce chapitre, les différents éléments du système photovoltaïque connectés au réseau électrique, en l'occurrence le générateur photovoltaïque, le hacheur survolteur et l'onduleur ont été modélisés et des simulations effectuées. La commande et la connexion au réseau électrique sont assurées par la synchronisation de la commande par rapport à l'évolution des tensions du réseau, qui a pour objectif de reconstituer une information sur la composante directe de la tension fondamentale.

Conclusion générale

Les travaux présentés portent sur l'application la plus récente des énergies renouvelables, qui est l'utilisation du solaire PV. Une meilleure rentabilité de ce système d'énergie renouvelable signifie nécessairement une meilleure adaptation, donc une plus large utilisation.

Pour ce faire des simulations sous Matlab/ Simulink sous différentes températures d'éclairage ont permis d'obtenir la puissance maximale fournie par la cellule PV correspondante.

L'énergie produite par les cellules photovoltaïques est difficile à exploiter, en raison de sa non-linéarité suivant la variation de la température. Ce qui entraîne une différence du point de fonctionnement, d'où la nécessité de concevoir des régulateurs pour surveiller le point de puissance maximale, quelle que soit la valeur d'éclairage ou la température. Pour optimiser un système photoélectrique à connecter au réseau, il faut bien choisir la configuration appropriée de l'onduleur. Ainsi sera assuré un fonctionnement optimal de la source PV lorsqu'elle sera connectée au réseau.

Ce travail a abordé l'étude détaillée des différentes ressources d'énergies renouvelables, leur importance et ainsi que les avantages et les inconvénients de chacune d'elles.

Le principe de fonctionnement du système photoélectrique a été minutieusement étudié, ses différents éléments et leurs modèles mathématiques abordés.

La modélisation et simulation d'un système photovoltaïque ont été effectuées sous environnement Matlab/Simulink avec optimisation de l'ensemble par utilisation MPPT et stratégie de commande de type P& O.

La modélisation du système PV consiste à la mise en équations des différentes parties le constituant : la source primaire (température et ensoleillement), les convertisseurs statiques : le hacheur survolteur (Boost) permettant la commande en tension du panneau photovoltaïque. Il s'agit donc d'optimiser le traitement global de l'énergie électrique au sein du système et en particulier au niveau du générateur, en plaçant celui-ci à chaque instant à son point optimal de fonctionnement grâce à un système de poursuite de type MPPT.

De plus, en raison de leur fonctionnement en commutation, ces convertisseurs statiques sont des générateurs de perturbations susceptibles de nuire au bon fonctionnement du générateur tant sur le plan électrique qu'énergétique. Sur le plan énergétique, les ondulations de la tension ou du courant à l'entrée de certains convertisseurs se traduisent par une oscillation du point de fonctionnement sur la caractéristique autour du point de puissance optimale, qui implique une dégradation de la conversion photovoltaïque. Pour ce faire, il faut améliorer la qualité de l'énergie produite.

L'objectif de ce travail est la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique. Les résultats obtenus par simulations répondent d'une manière générale aux références bibliographiques utilisées.

Ces résultats de simulation indiquent l'obtention de bonnes performances aussi bien en régimes permanent que transitoire.

Les perspectives à entreprendre peuvent être les suivantes :

- Etude comparative des performances de différents PV de constitutions ;
- Amélioration de la qualité de l'énergie produite par les PV ;
- Procéder à des essais réels avec comparaison des résultats obtenus avec ceux de la simulation.

Références bibliographiques

[1]: EurObserv'ER, "Twelfth Inventory of Worldwide Electricity Production from Renewable Energy Sources", 2010.

[2]: Site Internet, <http://www.scribd.com/doc/46661921/Les-energies-renouvelables>, Consulté le 12/06/2013.

[3]: <http://www.futura-sciences.com/>

[4]: MEKKI MOUNIRA " Récupération des déperditions d'énergie dans les complexes industriels et leur conversion en énergie électrique exploitable ".these doctorat UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA 2014.

[5]: Christian Ngô& Jean Bonal. Energies alternatives, Omiscience .La biomasse.

[6]: O. Gergaud, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, 2002.

[7]: Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.

[8]: Energie-solaire-angellier.e-monsite.com

[09]: Dégela M.L et Ben Ahmed .B "Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque "UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA .master 2017.

[10] R. Merahi, « Modélisation d'un diapositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateurs photovoltaïques », Mémoire de Magistère, Université de Annaba 2010.

[11] : Djarallah, Mohamed, "Contribution a l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couples au réseau électrique," université de Batna, Thèse de Doctorat en Science, 2008.

[12]: Daoude Amine, "Contrôle de la puissance d'un générateur photovoltaïque pour le Pompage Solaire", Thèse de Doctorat, Université d'Oran, 2013.

[13]: Benabda Amina " Contribution à l'étude d'une alimentation à base de panneaux photovoltaïques avec stockage" thèse doctorat. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA. Année 2018.

[14]: Zerguine Bilal "MODELISATION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION ELECTRIQUE PAR LA CELLULE PHOTOVOLTAIQUE "Magister .UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA 2010.

[15]: LAMRI BILAL " Analyse énergétique et intégration de la sûreté de fonctionnement dans un système photovoltaïque connecté au réseau électrique" THÈSE Doctorat. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA 2018.

[16] : « Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin ». W.C. Benmoussa, S. Amara et A. Zerga Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen (2007) 301 – 306.

[17]: Bendjellouli Zakaria, contribution à la modélisation d'une cellule solaire, Université de Bechar, 2009.

[18] Rapport de stage projet de fin d'études Ingénieur Technique Industrielle, Septembre 2006, Réalisation de Technique MPPT numérique, par Alain Bilbao Learreta, Université Virgile.

[19]: S. Brigand, «principe du photovoltaïque », complément technique 2008, www.Editionsdumoniteur.com

[20]:AZIZI Amina "Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride " .thèse doctorat Université BADJI MOKHTAR ANNABA 2019.

[21]:M. SLAMA Fateh"Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique." Mémoire de Magister, département d'Électrotechnique. UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF.

[22]:M. PETIBON Stéphane "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques".thesedoctorat .universitetoulouse 2009.

[23]: N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie Buck-boost appliquée à un MPPT » .Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.

[24]:B. Mounir,K Mahdi "Etude et simulation de chaine d'une conversion de production photovoltaïque "MEMOIRE DE MASTER .Université BADJI MOKHTAR ANNABA.2018.

[25]:Touil.N, Ghenbazi .S "modelisation et simulation d'un système photovoltaïque" .master 2015 Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued.

[26] R .Merahi, "Modélisation d'un dispositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateur photovoltaïque", Magister, Université Annaba, 2010.

[27] : Olivier GERGAUD, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, Ecole normale supérieure Cachan, 2002.

[28]:A. Saadi, "Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque," Université de Biskra Mémoire de Magister, 2000.

[29]. G. Haizea, « Etude de structure d'intégration des systèmes de génération décentralisés : application aux microréseaux ». Thèse de doctorat dans le cadre de l'Ecole Doctorale de Grenoble, 15 Décembre 2006.

[30] R. Merahi, « Modélisation d'un diapositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateurs photovoltaïques », Mémoire de Magistère, Université de Annaba 2010.

[31]. M.A.E. Alali, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension ». Automatisation des systèmes de puissance électriques, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, 2002.

[32]. E. GholipourShahraki, « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques ». Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, Octobre 2003.

[33]. Touzani Youssef, " Commande aléatoire du convertisseur Buck-Boost triphasé à prélèvement sinusoïdal du courant", thèse de Doctorat, Université de Clermont-Ferrand, 10/07/2006.