

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-
ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE : Sciences de l'Ingénierat
DEPARTEMENT : Électrotechnique

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Électrotechnique

OPTION : Commande électrique

Thème

Etude et simulation d'une chaîne de production photovoltaïque

Présenté par :

Bendali Braham Mounir
Khelif Mahdi

Dirigé par :

Mr. Mohammedi Moufid

Jury de soutenance :

- | | | | |
|--------------------------|------------|-----|---------------------|
| - Kelaiaia Mounia Samira | Président | MCA | Université d'Annaba |
| - Bouchikha Hocine | Rapporteur | MCB | Université d'Annaba |
| - Bouazza Salah Eddine | Examineur | MCA | Université d'Annaba |

Promotion : Juin 2018

Remerciements

*Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir
donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail*

*Nous tenons à remercier nos encadreurs Mr. Mohammedi
Moufid d'avoir posé un sujet très intéressant et pour leurs
conseils, leur disponibilité et pour nos avoir fait profiter de leurs
connaissances et de leurs qualités tant professionnelles
qu'humaines.*

*Nos respectueux remerciements à l'ensemble des membres du jury
pour l'intérêt porté sur mon travail.*

*Nous voudrions aussi remercier Mr. Bahi Taher qui nous a aidé
pour le bon déroulement de ce travail et tout personne qui nous
aidé à atteindre ce point-là.*

DEDICACE

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

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que Dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

Ma Mère

A mes sœurs

Akram et Zakaria

Aux chers amis surtout

.....

A tous ce que j'aime et qui m'aiment

A tous mes collègues d'études surtout ceux

D'électrotechnique

A vous.....

Mahdi

DEDICACE

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

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que Dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

Mes Parent

A mes frères

.....

A tous ce que j'aime et qui m'aiment

A tous mes collègues d'études surtout ceux

D'électrotechnique

A vous.....

Mounir

Résumé

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 optimale 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

Summary

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

For optimal system operation, maximum power generation of the PV generator (MPPT) must be ensured in all climatic conditions. The adaptation between the photovoltaic generator and the load has been carried out DC / DC converter. And the injection of energy to the network is ensured by a multi-level inverter with multiple triangular-sinusoidal PWM control.

Keywords: photovoltaic sources, energy quality, Distribution network

ملخص

الهدف من هذه الرسالة هو ضمان حقن الطاقة الكهربائية التي تنتجها محطة الكهروضوئية في شبكة التوزيع. يتضمن تكوين هذا النظام مولدًا ضوئيًا، ومتصلًا بمروحية معززة، وعاكس للجهد متعدد المستويات، ومرشح وتحميل. لتشغيل النظام الأمثل، يجب ضمان الحد الأقصى لتوليد الطاقة للمولد الكهروضوئي (MPPT) في جميع الظروف المناخية. تم تنفيذ التكيف بين المولدات الضوئية والحمولة محول DC / DC. ويتم ضمان حقن الطاقة للشبكة عن طريق DC/AC متعدد المستويات مع تحكم PWM ثلاثي مثلث - جيلبي.

كلمات البحث: مصادر الضوئية، ونوعية الطاقة، وشبكة التوزيع

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : état de l'art

I. 1 Introduction	3
I. 2 Pourquoi l'énergie renouvelable ?	3
I.2.1 Comparaisons au niveau des origines, des caractéristiques et des utilisations.....	3
I.2.2 Comparaisons de la localisation, de la variabilité dans le temps et l'espace	4
I.2.3 Comparaisons au niveau politique et économique.....	5
I.2.4 Comparaisons de l'impact environnemental.....	6
I. 2.4.1 Energies fossiles	6
I. 2.4.2 Energies renouvelables	7
I. 3. Différents types d'énergies renouvelables	8
I.3.1 Energie éolienne	8
I.3.2 Energies hydrauliques.....	9
I. a)Energie des vagues	9
I. b)Energie marémotrice	10
I. c)Energie hydrolienne.....	10
I. d)Energie thermique des mers.....	11
I. e)Energie osmotique	11
I. 3.3 Biomasse.....	11
I. 3.4 Energie géothermique.....	12
I. 3.5 Energie solaire.....	13
I. a) Energie solaire thermique.....	13
I. b) Energie photovoltaïque.....	14
I. 4. Historique des panneaux photovoltaïques	15
I. 5 Modes d'utilisation d'un système solaire photovoltaïque	15
I. 5.1 Système autonome.....	16
I. 5.2 Système hybride.....	16
I. 5.3 Système PV raccordée au réseau.....	17
I. 6 Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque	18
I.6.1 Avantages	18
I.6.2 Inconvénients	18
I. 7 Conclusion	19

Chapitre 2 : Modélisation d'un système PV et détermination de la MPPT

II.1 Introduction	20
--------------------------------	-----------

II.2 Modélisation et Simulation d'une cellule photovoltaïque	21
---	-----------

II.2.1 Modélisation de la cellule photovoltaïque.....	21
II. 2.1.1 Constitution d'une cellule photovoltaïque	21
II.2.1.2 Principe de fonctionnement.....	22
II.2.1.3 Les différents types des panneaux photovoltaïques	24
II.2.1.4 Comparaison du rendement entre les différentes technologies	24
II.2.1.5 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	25
II.2.1.6 Mise en équation de la cellule photovoltaïque.....	25

II.2.2 Simulation et interprétation des résultats	26
II.2.2.1 Caractéristique tension-courant	26
II.2.2.2 Caractéristique puissance-tension et puissance-courant	28
II.2.2.3 Effets extérieur et intérieur sur les grandeurs électriques de la cellule	28
a) Effets extérieurs	28
b) Effets intérieurs	31
II.2.2.4 Différents types de connexions des cellules photovoltaïques.....	32
II.3. Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT).....	36
II.3.1 Les Convertisseurs DC-DC (Les Hacheurs).....	37
II.3.2 Comparaison entre les différents types de convertisseur DC-DC.....	37
II.3.3 Hacheur survolteur (boost) : modélisation et simulation.....	38
a) Principe de fonctionnement et circuit équivalent.....	38
b) Modèle mathématique équivalent.....	39
c) Conception d'un hacheur Boost.....	41
II.3.4 Simulation	41
II.3.5 différents techniques de recherche du point de fonctionnement optimale.....	42
II.3.5.1 Algorithme perturbation et observation (P&O).....	42
II.3.5.2 Algorithme incrémental de la conductance (INC).....	44
II.3.5.3 Autres méthodes.....	46
II.3.5.4 Critères de qualité d'une commande MPPT.....	47
II.3.6 Simulation du système PV-Hacheur avec la commande MPPT.....	47
II.3.6.1 Modèle avec irradiation et température constante ($G=1000\text{w/m}^2$, $T=25\text{c}^\circ$).....	48
a) Sortie de photovoltaïque.....	48
b) Sortie de l'hacheur	49
II.3.6.2 Modèle avec température variable et irradiation variable.....	50
a) Température variable.....	50
b) Irradiation variable	51
II.4. Conclusion	52

Chapitre 3 : Raccordement d'un système PV au réseau électrique

III.1 Introduction.....	53
III.2 Onduleurs	54
III.2.1 Technologies de couplage des onduleurs avec le réseau	54
III.2.1.1 Onduleurs modulaires (module inverter)	55
III.2.1.2 Onduleurs centralisés (central inverter)	55
III.2.1.3 Onduleurs "String" - ou " de Rangée"	55
III.2.2 Modélisation d'un Onduleur	56

Sommaire

III.2.2.1 Structure de l'onduleur.....	56
III.2.2.2 Commande de l'onduleur	57
III.3 Caractéristiques des onduleurs compatibles avec le réseau	59
III.4 Réseau électrique.....	60
III.4.1 Interface de raccordement au réseau électrique	60
III.4.2 Système triphasé	61
III.5 Interaction entre le réseau de distribution et les systèmes PV.....	62
III.5.1 Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution	63
III.5.1.1 Influence sur le plan de tension.....	63
III.5.1.2 Influence sur le plan de protection	63
III.5.1.3 Influence sur la qualité de l'énergie	63
a) Injection d'harmoniques de courant	63
b) Injection de courant continu au réseau	64
III.5.2 Influence du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques .	
III.5.2.1 Régime de neutre et courants de fuite	64
III.5.2.2 Niveau de tension du réseau	65
III.5.2.3 Présence de composante continue et d'harmoniques de tension	65
III.6 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques connectent au réseau...65	
III.6.1 Avantages.....	65
III.6.2 Inconvénients.....	65
III.7 Problème de synchronisation (onduleur-réseau).....	66
III.8 Simulation global de PV raccordé au réseau	67
III.8.1Schéma de simulation	67
III.8.2 Résultats de simulation	67
a) Tension et courant du réseau	67
b) Effet de la variation de l'irradiation.....	68
c) Effet de la variation de température.....	70
III.9 Conclusion	72
Conclusion générale	73
Annexe	
Bibliographie	

Liste des figures

Fig. Relations entre les différentes formes d'énergie

Chapitre I

Fig. (I.1) : Energie renouvelable (le bois) - énergie fossile (le pétrole).

Fig. (I.2) : Localisation des énergies.

Fig. (I.3) : Oiseau mazouté.

Fig. (I.4) : Usine de raffinage.

Fig. (I.5) : Champs d'éoliennes.

Fig. (I.6) : Buse tuée par les éoliennes.

Fig. (I.7). Energie éolienne.

Fig. (I.8) : Énergie des vagues.

Fig. (I.9) : Énergie marémotrice.

Fig. (I.10) : Énergie hydrolienne.

Fig. (I.11) : Énergie thermique des mers.

Fig. (I.12) : Production d'électricité par osmose.

Fig. (I.13) : Biomasse.

Fig. (I.14) : Énergie géothermique.

Fig. (I.15) : Energie solaire.

Fig. (I.16) : Energie solaire thermique.

Fig. (I.17) : Champ photovoltaïque.

Fig. (I.18) : Exemple de la structure d'un système PV autonome.

Fig. (I.19) : Exemple de la structure d'un système PV hybride.

Fig. (I.20) : Exemple de la structure d'un système PV raccordé au réseau.

Chapitre II

Fig. (II.1) : Schéma de principe du convertisseur MPPT.

Fig. (II.2) : Cellule photovoltaïque.

Fig. (II.3) : Description d'une cellule.

Fig. (II.4) : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction.

Liste des figures

Fig. (II.5) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Fig. (II.6) : Caractéristique courant-tension.

Fig. (II.7) : Caractéristique Puissance-courant.

Fig. (II.8) : Caractéristique Puissance-tension.

Fig. (II.9) : Effet de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$.

Fig. (II.10) : Effet de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$.

Fig. (II.11) : Effet de la température sur la caractéristique $I=f(V)$.

Fig. (II.12) : Effet de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

Fig. (II.13) : Effet de la variation de R_s sur la caractéristique $I=f(V)$.

Fig. (II.14) : Effet de la variation de R_s sur la caractéristique $P=f(V)$.

Fig. (II.15) : Effet de la variation de R_s sur la caractéristique $P=f(I)$.

Fig. (II.16) : Effet de la variation de R_{sh} sur la caractéristique $P=f(V)$.

Fig. (II.17) : Effet de la variation de R_s sur la caractéristique $I=f(V)$.

Fig. (II.18) : Effet de la variation de R_{sh} sur la caractéristique $P=f(I)$.

Fig. (II.19) : Association de N_s modules solaires en série.

Fig. (II.20) : Association série des cellules solaire.

Fig. (II.21) : Association de N_p modules solaires en parallèle.

Fig. (II.22) : Association parallèle des cellules solaire.

Fig. (II.23) : Association mixte $N_s \times N_p$ modules solaires.

Fig. (II.24) : Association mixte des cellule solaires.

Fig. (II.25) Courbe caractéristique de puissance d'un GPV.

Fig. (II.26) Schéma de principe de l'hacheur.

Fig. (II.27) Circuit électrique de l'hacheur Boost.

Fig.(II. 28): Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.

Fig. (II.29) Circuit équivalent du Boost lorsque S fermé.

Fig. (II.30) Circuit équivalent du Boost lorsque S ouvert.

Liste des figures

Fig. (II.31) Schéma bloc d'un hacheur boost.

Fig. (II.32) Tension d'entrée de l'hacheur.

Fig. (II.33) Tension de sortie de l'hacheur.

Fig. (II.34) Courant de sortie de l'hacheur.

Fig. (II.35) Puissance de sortie de l'hacheur.

Fig. (II.36) Caractéristique $P_{GS}(V_{GS})$ d'un panneau solaire GPV.

Fig. (II.37) Algorithme type de la méthode P&O.

Fig. (II.37) Algorithme type de la méthode INC.

Fig. (II.39) Schéma de simulation de panneaux photovoltaïque avec un hacheur boost.

Fig. (II.40) Variation temporelle du courant.

Fig. (II.41) Variation temporelle de la tension.

Fig. (II.42) Variation temporelle de la puissance.

Fig. (II.43) Caractéristique I-V.

Fig. (II.44) Caractéristique P-V.

Fig. (II.45) Variation temporelle du courant.

Fig. (II.46) Variation temporelle de la tension.

Fig. (II.47) Variation temporelle de la puissance.

Fig. (II.48) La variation de la température.

Fig. (II.49) Tension de sortie de l'hacheur.

Fig. (II.50) Courant de sortie de l'hacheur.

Fig. (II.51) Puissance de sortie de l'hacheur.

Fig. (II.52) La variation de l'irradiation.

Fig. (II.53) Tension de sortie de l'hacheur.

Fig. (II.54) Courant de sortie de l'hacheur.

Fig. (II.55) Puissance de sortie de l'hacheur.

Fig. (II.56) Signal de la gâchette d'IGBT de l'hacheur (MPPT).

Chapitre III

Fig. (III.1) Schéma globale d'un système PV raccordé au réseau.

Fig. (III.2) : Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé.

Fig. (III.3). Classification des onduleurs PV connectés au réseau [21].

Fig. (III.4) Structure d'un onduleur triphasé.

Fig. (III.5) Commande des interrupteurs par hystérésis [26].

Fig. (III.6) : Schéma de simulation d'une commande MLI.

Fig. (III.7) : Signale de la commande MLI et les impulsions des interrupteurs.

Fig. (III.8) : Schéma générale de production, transport et distribution de l'énergie électrique.

Fig. (III.9) Schéma simplifié de la liaison au réseau.

Fig. (III.10) : Système de tensions triphasé équilibré.

Fig. (III.11). Schéma block de simulation.

Fig. (III.12) Schéma global de simulation d'un panneau photovoltaïque raccordée aux réseaux électriques.

Fig. (III.13) Tensions de réseau V_{abc} .

Fig. (III.14) Courants du réseau I_{abc} .

Fig. (III.15) Variation de l'irradiation G utilisé.

Fig. (III.16) Tension de sorti de l'onduleur V_{abc} .

Fig. (III.17) Courant de sorti de l'onduleur I_{abc} .

Fig. (III.18) Couplage de tension de sortie de l'onduleur avec le réseau.

Fig. (III.19) Variation de la température utilisée.

Fig. (III.20) Tension de sorti de l'onduleur V_{abc} .

Fig. (III.21) Courant de sorti de l'onduleur I_{abc} .

Fig. (III.22) Couplage de tension de sortie de l'onduleur avec le réseau.

Tableau. (II.1) Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques

Tableau. (II.2) Comparaison les principaux convertisseurs DC-DC

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 (voir la figure ci-dessus) [1].

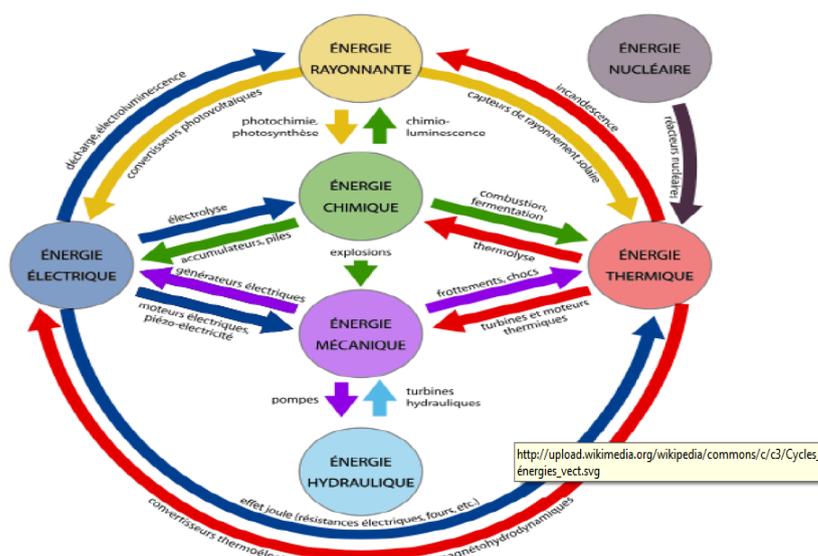


Fig. Relations entre les différentes formes d'énergie

L'électricité est aujourd'hui produite dans le monde à près de 80.9%, 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 [2]. 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 [1]. 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.

Notre mémoire contient trois chapitres :

Au premier chapitre, on évoque les énergies renouvelables et leur comparaison aux énergies fossiles puis les spécificités sur l'énergie des panneaux photovoltaïques sont présentées.

Le deuxième chapitre décrit une étude préliminaire de cellule photovoltaïque et ces caractéristiques électriques. Par la suite, la structure, le principe et les types du convertisseur continu/continu DC/DC seront développés. On y trouve aussi leur modèle mathématique et leur commande.

Dans le troisième chapitre, on localise notre étude sur le raccordement du système photovoltaïque au réseau électrique via un onduleur de tension tout en tenant compte, essentiellement, de la synchronisation(PLL : phase lock label).

Chapitre I

I. 1 Introduction

Les énergies fossiles sont considérées comme épuisables à l'échelle humaine, Ces ressources sont limitées, par contre qu'une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvele assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. La conversion de la lumière émise par le soleil en électricité, est appelée effet photovoltaïque.

L'énergie solaire est captée par des cellules photovoltaïques, dont le rôle est de produire de l'électricité lorsqu'elle est exposée à la lumière. Plusieurs cellules peuvent être connectées entre elle pour former un module solaire photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque.

Ce chapitre est donc consacré à la production de l'électricité à partir de l'énergie solaire aux les éléments liés à cette ressource et sa transformation en énergie électrique.

I. 2 Pourquoi l'énergie renouvelable ?

Pour montrer l'intérêt et l'importance de l'énergie renouvelable nous allons comparer cette dernière avec les énergies fossiles par rapport aux quatre grands domaines :

- Origine, caractéristique et utilisation.
- Localisation et variabilité dans l'espace et dans le temps.
- Politique et économique.
- Environnemental.

I. 2.1 Comparaisons au niveau des origines, des caractéristiques et des utilisations

Les sources d'énergies fossiles sont celles qui sont issues de la fossilisation de matière organique dans le sous-sol terrestre alors que les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels, réguliers ou constants, provoqués par les astres (principalement le soleil).

La densité énergétique des énergies fossiles est très supérieure aux énergies renouvelables. Sans utilisation de technologies pour concentrer les énergies renouvelables, elles ne peuvent produire de grandes puissances

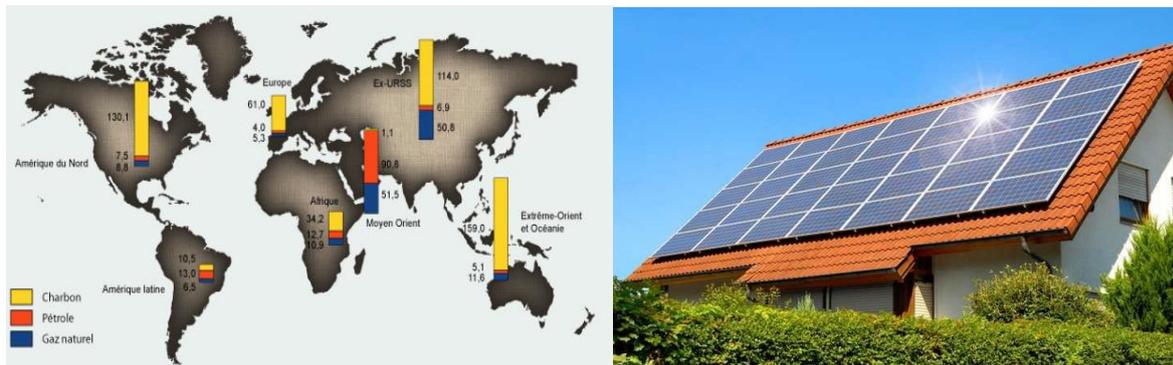


Fig. (I.1). Energie renouvelable (le bois) - énergie fossile (le pétrole).

I. 2.2 Comparaisons de la localisation, de la variabilité dans le temps et l'espace

- **Localisation**

Les gisements des énergies fossiles sont très localisés. Ils sont souvent éloignés des sites de consommation (a). Par contre les énergies renouvelables Elles sont décentralisées. Elles sont disponibles partout, sur toute la planète, bien que ce soit en quantités différentes (b).



(a) Energies fossiles

(b) Energies renouvelables

Fig. (I.2) ; localisation des énergies fossiles et renouvelables

- **Variabilité dans l'espace et dans le temps de la densité énergétique**

Les énergies fossiles ont des caractéristiques énergétiques (densité énergétique) fixées dans le temps et l'espace. Les énergies fossiles ne nécessitent pas de moyens technologiques pour être stockées. Elles sont facilement transportables.

D'autre part les énergies renouvelables solaires sont variables dans le temps et l'espace. Cette disponibilité variable peut entraîner un déphasage entre le moment de production de l'énergie et le moment de sa consommation. Pour remédier à ce problème, le stockage est parfois indispensable.

I. 2.3 Comparaisons au niveau politique et économique

Le type d'énergie et son mode d'exploitation déterminent d'une certaine manière la structure sociale, le mode d'organisation de la société ainsi que l'aménagement du territoire.

- **Le mode d'organisation de la société**

L'exploitation des ressources fossiles, finie et centralisée, induit une organisation sociale centralisée et pyramidale. Les énergies fossiles sont des sources de puissance, elles entraînent une dépendance entre les pays producteurs et les pays qui ne possèdent pas ces énergies.

A l'opposé, l'exploitation des énergies renouvelables induisent une organisation décentralisée semblable à celle du réseau d'Internet. Ce réseau n'est pas un réseau de puissance mais un réseau d'énergie importante. Elles améliorent l'indépendance énergétique.

Ce réseau peut être une opportunité : il est adapté à celui des sociétés rurales décentralisées. Les énergies renouvelables sont donc une opportunité pour les pays à forte ruralité comme le sont de nombreux pays en développement.

- **La structure sociale**

L'exploitation des ressources fossiles induit implicitement un rapport de droit. La production, la distribution de l'énergie, la fiabilité du réseau ne le concernent pas.

Les ressources renouvelables, décentralisées, de puissance faible, d'énergie importante n'est pas une énergie de droits mais une énergie de responsabilités, contrairement aux énergies fossiles. En effet, l'énergie dont dispose l'utilisateur dépendant de sa décision d'investissement initial, du soin d'entretien de l'installation, de sa responsabilité.

- **Niveau économique**

Nous ne pouvons en disposer naturellement comme nous disposons des énergies renouvelables. Nous devons les payer pour y avoir accès. Les déchets sont coûteux.

D'autre part le soleil, l'eau, le vent, la biomasse sont gratuits. Ce sont les technologies d'exploitation de ces énergies qui sont payantes. Les déchets sont peu coûteux.

I. 2.4 Comparaisons de l'impact environnemental

I. 2.4.1 Energies fossiles

- **Risques liés aux extractions**

Les exploitations minières de charbon à un impact sur le paysage. L'extraction de pétrole ou de gaz a aussi un impact géophysique.

- **Risques liés au transport**

La préparation et le transport des combustibles depuis les lieux d'extraction jusqu'aux lieux d'utilisation impliquent un ensemble d'infrastructures lourdes (voies ferrées, ports, routes, conduites, raffineries, stockages...) qui mobilisent des espaces spécifiques (espaces littoraux ou des sites de vallées...). Ce transport génère parfois des risques (accidents, marées noires, pratique du dégazage en mer).



Fig. (I.3) ; Oiseau mazouté

- **Risques liés au traitement**

Le raffinage s'accompagne du rejet dans l'environnement de composés organiques gazeux et de liquides (phénols, produits ammoniacaux...).

Les produits de combustion rejetés dans l'atmosphère sont constitués en premier lieu de dioxyde de carbone (CO₂), et de vapeur d'eau et contiennent aussi, en proportions variables du monoxyde de carbone et du méthane, les gaz HCFC utilisés en réfrigération.

L'utilisation des combustibles fossiles est le principal facteur de l'accroissement de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère que l'on constate actuellement. Cet accroissement induit un renforcement de l'effet de serre et tend par conséquent à provoquer une augmentation des températures moyennes à la surface de la terre.



Fig. (I.4) ; Usine de raffinage

- **Déchets produits par les énergies fossiles**

Les déchets sont produits pendant leur utilisation (centrales thermiques à hydrocarbures, nucléaires). Les déchets sont produits en quantité importante et peuvent être très dangereux.

I. 4.2 Energies renouvelables

- **Impact sur le paysage**

La construction des installations nécessaires a parfois un impact sur le paysage. C'est pourquoi des efforts sont faits pour tenter d'intégrer ces installations dans le paysage (peindre les éoliennes en vert).



Fig. (I.5) ; Champs d'éoliennes

- **Risques pour la faune**

La construction d'un barrage hydroélectrique a des conséquences lourdes : inondation de vallées entières, modification profonde de l'écosystème local. On a également accusé les éoliennes de représenter un danger pour les oiseaux les chauves-souris.



Fig. (I.6) ; Buse tuée par les éoliennes.

- **Impact sur l'effet de serre**

La production de gaz à effet de serre est le plus souvent faible pendant la production d'énergie.

- **Déchets produits par les énergies renouvelables**

Les déchets sont peu dangereux, les impacts en cas d'accident grave sont facilement maitrisables comparés à ceux de l'industrie électronucléaire ou pétrolière (exemple de Tchernobyl).

Les déchets produits sont essentiellement des déchets de démantèlement des installations de production en fin de vie.

I. 3 Différents types d'énergies renouvelables

I. 3.1 Energie éolienne

L'activité solaire est la principale cause des phénomènes météorologiques. Ces derniers sont notamment caractérisés par des déplacements de masses d'air à l'intérieur de l'atmosphère. C'est l'énergie mécanique de ces déplacements de masse d'air qui est à la base de l'énergie éolienne. L'énergie éolienne consiste ainsi, à utiliser cette énergie mécanique.

L'énergie éolienne a été vite exploitée à l'aide de moulins à vent équipés de pales en forme de voile, ces moulins utilisent l'énergie mécanique pour actionner différents équipements.

Aujourd'hui, ce sont les éoliennes qui prennent la place des moulins à vent. Les éoliennes transforment l'énergie mécanique en énergie électrique, soit pour l'injecter dans un réseau de distribution, soit pour être utilisée sur place (site isolé de réseau de distribution).



(a)- Eoliennes

b- Moulins à pales en forme de voile

Fig. (I.7). Energie éolienne

I. 3.2 Energies hydrauliques

À l'instar de l'énergie éolienne, les énergies hydrauliques (à l'exception de l'énergie marémotrice) ont leur origine principale dans les phénomènes météorologiques et donc à l'énergie solaire. Le soleil provoque l'évaporation de l'eau, principalement dans les océans et en libère une partie sur les continents à des altitudes variables. On parle du cycle de l'eau pour décrire ces mouvements. L'eau (en fait, la vapeur d'eau) acquiert, en altitude, une énergie potentielle de pesanteur ; lorsque l'eau tombe, cette énergie peut être captée et transformée dans des barrages hydroélectriques, lors du retour de l'eau vers les océans. Avant l'avènement de l'électricité, les moulins à eau permettaient de capter cette énergie mécanique pour entraîner des machines ou des outils (machines à tisser, moulins à moudre le blé, etc.).

D'autres énergies hydrauliques existent et proviennent généralement de sources marines :

a) Energie des vagues

elle est produite par le mouvement des vagues et peut être captée par des dispositifs tels le Pélamis, sorte de ver en métal articulé, le Searev ou encore le PH4S toujours au stade de prototype et qui utilise 4 sources d'énergie permettant une autonomie complète en mer. Leur puissance correspond à celle d'une petite éolienne.



Fig. (I.8). Énergie des vagues

b) Energie marémotrice

Elle est produite par le mouvement de l'eau créé par les marées (variations du niveau de la mer, courants de marée),



fig (I.9). Énergie marémotrice

c) Energie hydrolienne

Elle est issue de l'utilisation des courants sous-marins,

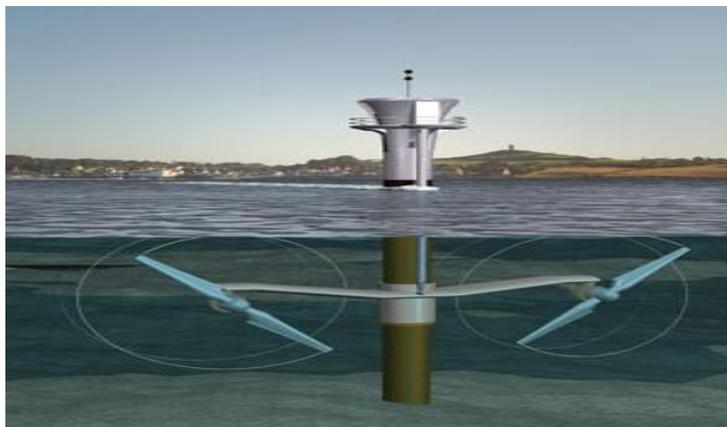


fig (I.10). Énergie hydrolienne

d) Energie thermique des mers

Elle est produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans,



fig (I.11). Énergie thermique des mers

e) Energie osmotique

Elle a pour origine la diffusion ionique qui a lieu lors de l'arrivée et du mélange d'eau douce dans l'eau salée de la mer. L'idée remonte aux années 1970, elle consiste à tirer parti du phénomène d'osmose qui se produit lors du mélange d'eau de mer et d'eau douce (grâce à leur salinité différente). La première centrale osmotique a été ouverte en 2009 à Hurum en Norvège par la société Stat kraft à l'embouchure du Fjord d'Oslo au bord de la Mer du Nord.

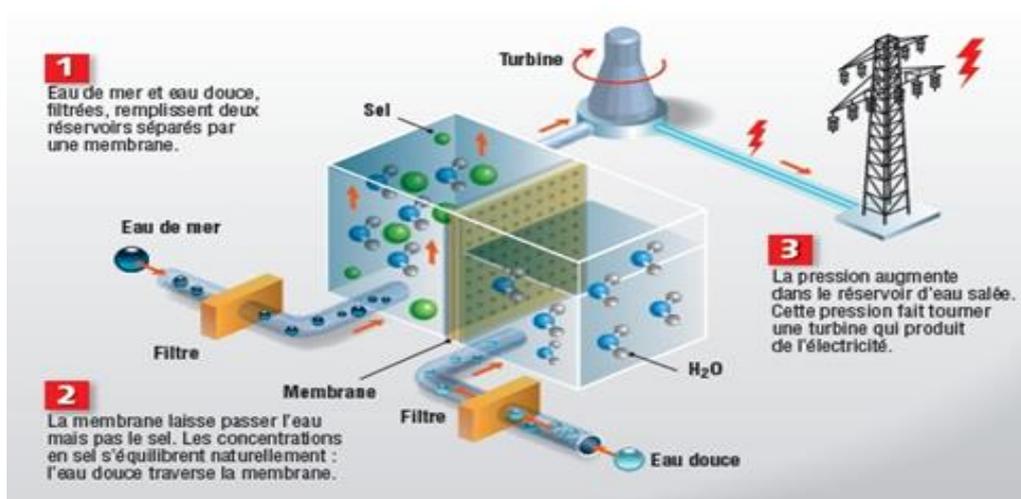


Fig. (I.12) Production d'électricité par osmose

I. 3.3 Biomasse

Indirectement, il s'agit d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse. Elle est exploitée par combustion ou métabolisation. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites ; cette condition n'est pas toujours remplie. On peut citer notamment le bois et les biocarburants.



Fig. (I.13) biomasse

I. 3.4 Energie géothermique

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. Dans les couches profondes, la chaleur de la Terre est produite par la radioactivité naturelle des roches du noyau et de la croûte terrestre : c'est l'énergie nucléaire produite par la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie profonde ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).



Fig. (I.14) Énergie géothermique

I. 3.5 Energie solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique dans lequel se trouvent notamment les rayons cosmiques, gamma, X, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes et les ondes radios en fonction de la fréquence d'émission. Tous ces types de rayonnements électromagnétiques véhiculent de l'énergie. Le niveau d'irradiance (le flux énergétique) mesuré à la surface de la Terre dépend de la longueur d'onde du rayonnement solaire.

Deux grandes familles d'utilisation de l'énergie solaire à cycle court se distinguent :

- L'énergie solaire thermique, utilisation de la chaleur transmise par rayonnement,
- L'énergie photovoltaïque, utilisation du rayonnement lui-même pour produire de l'électricité.



Fig. (I.15) Energie solaire

a) Energie solaire thermique

L'énergie thermique peut être utilisée directement ou indirectement :

- directement pour chauffer des locaux ou de l'eau sanitaire (serres, architecture bioclimatique, panneaux solaires chauffants et chauffe-eau solaire) ou des aliments (fours solaires),
- indirectement pour la production de vapeur d'un fluide caloporteur pour entraîner des turbines et ainsi, obtenir une énergie électrique (énergie solaire thermodynamique (ou *hélio thermodynamique*)).

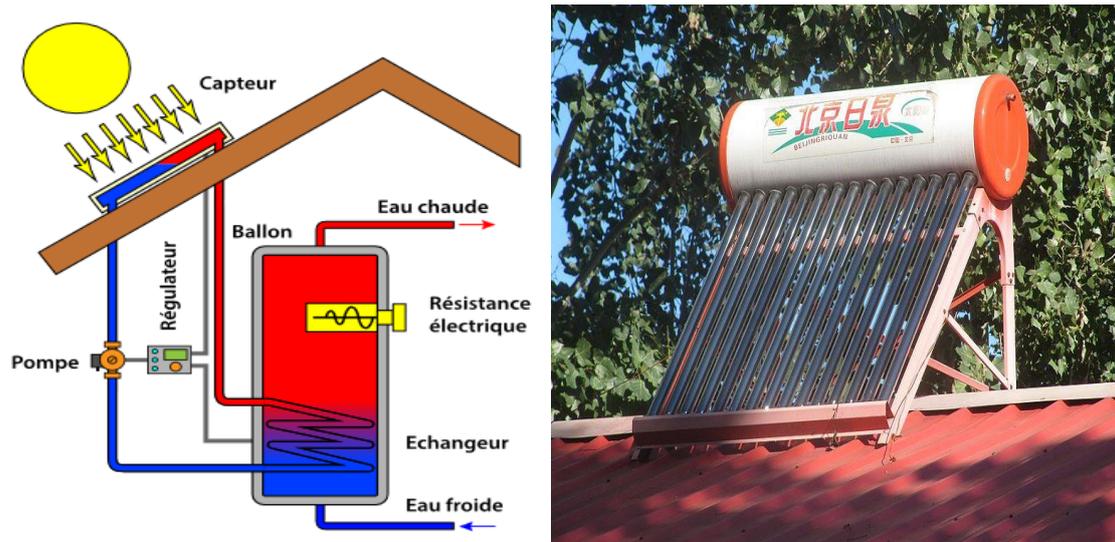


Fig. (I.16) Energie solaire thermique

b) Energie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu. Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou artificielle (une ampoule). Une installation photovoltaïque connectée à un réseau d'électricité se compose généralement de plusieurs panneaux photovoltaïques, leur nombre pouvant varier d'une dizaine à plusieurs milliers.

Il existe plusieurs technologies de modules solaires photovoltaïques :

- Les modules solaires monocristallins possèdent le meilleur rendement au m² et sont essentiellement utilisés lorsque les espaces sont restreints et pour optimiser la production d'une centrale photovoltaïque.
- Les modules solaires poly cristallins représentent une technologie proposant des rendements plus faibles que la technologie monocristalline.
- Les modules solaires amorphes sont des panneaux solaires proposant un rendement largement inférieur aux modules solaires cristallins. Cette solution nécessite donc une plus grande surface pour la même puissance installée.



Fig. (I.17) Champ photovoltaïque

I. 4 Historique des panneaux photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été découvert par Antoine Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

L'énergie photovoltaïque s'est développée dans les années 50 pour l'équipement de vaisseaux spatiaux et le premier a été lancé dans l'espace en 1958. C'était le seul procédé non-nucléaire d'alimenter des satellites en énergie. Les images satellites reçues par votre téléviseur ne vous parviennent que grâce à l'énergie photovoltaïque. Pendant les années 70 et 80, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. La croissance de l'industrie fut spectaculaire. Depuis le début des années 80, la quantité de modules photovoltaïques expédiés par an (mesurés en MW-Crêtes) a augmenté et le prix des modules (par Watt-Crête) diminuait au fur et à mesure que le nombre de modules fabriqués augmentait. Bien que le prix se soit quelque peu stabilisé, la quantité de modules photovoltaïques expédiés chaque année continue d'augmenter.

I. 5 Modes d'utilisation d'un système solaire photovoltaïque

Le choix du mode d'utilisation d'un système solaire se fait selon des exigences imposées que ce soit technique, économique ou géométrique. Pour cela il existe principalement trois modes à savoir :

- Autonome
- Hybride
- raccordée au réseau

I. 5.1 Système autonome

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la Figure (II 16) qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé aux générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de La production Ce système de stockage représente une part très importante du coût de l'installation, et ces conditions de fonctionnement sont très contraignantes. Par conséquent, des systèmes de gestion de l'énergie ont été développés afin d'optimiser la durée de vie du système de stockage et de réduire les coûts de fonctionnement [2]

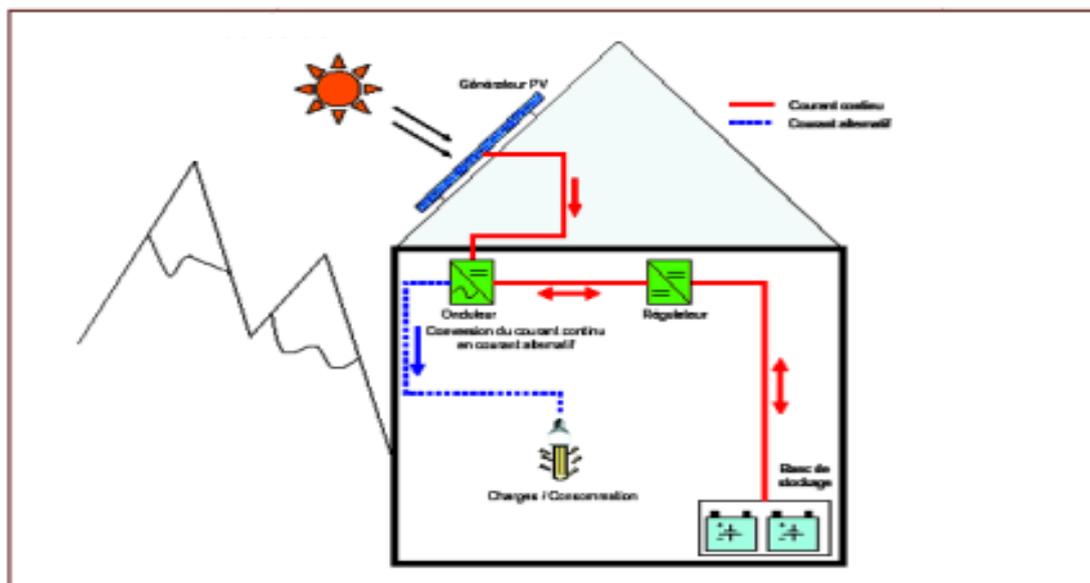


Fig. (I.18) : Structure d'un système PV autonome

I. 5.2 Système hybride

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée [2].

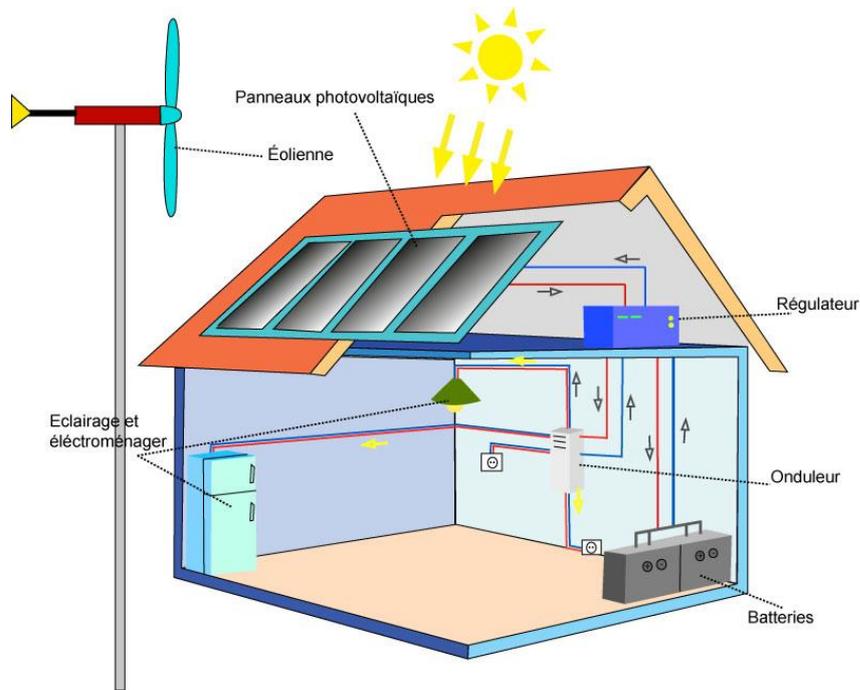


Fig. (I.19) : Exemple de la structure d'un système PV hybride

I. 5.3 Système PV raccordée au réseau

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des « strings », eux même reliés à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings [3].

Si la consommation locale est supérieure à la production de l'installation PV, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs.

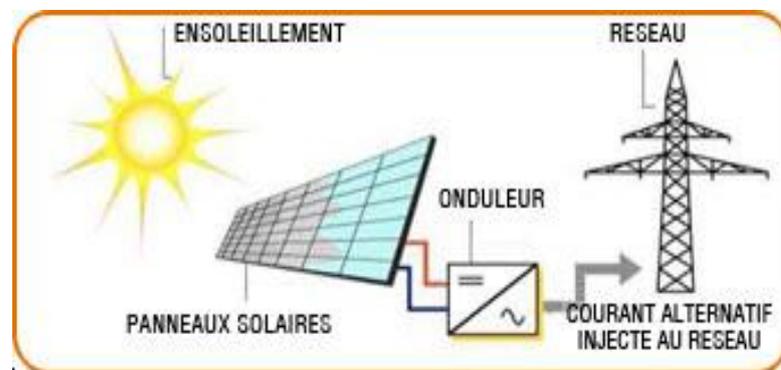


Fig. (I.20) : Structure d'un système PV raccordé au réseau

I. 6 Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque

I. 6.1 Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

- D'abord, une haute fiabilité - elle ne comporte pas de pièces mobiles - qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I. 6.2 Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients...

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

I. 7 Conclusion

Les énergies renouvelables sont des énergies dont la source est illimitée et dont l'exploitation cause le moins de dégâts écologiques. Elles se présentent sous formes diverses, décentralisées et gratuites. Parmi elles on cite l'énergie solaire dite énergie propre, car elle ne génère aucun gaz à effet de serre. L'énergie solaire est une ressource abondante et inépuisable qui 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 public ou industriel elle fait bénéficier d'un prix incitatif de rachat de l'électricité.

Chapitre II

II. 1 Introduction

Pour assurer le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque (GPV), un équipement de commande doit être mis entre le GPV et la charge Fig. (II.1), dont le but est l'adaptation des deux équipements (générateur photovoltaïque - charge) pour un meilleur transfert d'énergie vers la charge. Ce dernier peut augmenter d'une manière significative le rendement en puissance de GPV, nous utilisons pour cela un convertisseur DC-DC (hacheur) muni d'une commande de la poursuite de point de puissance maximale(MPPT).

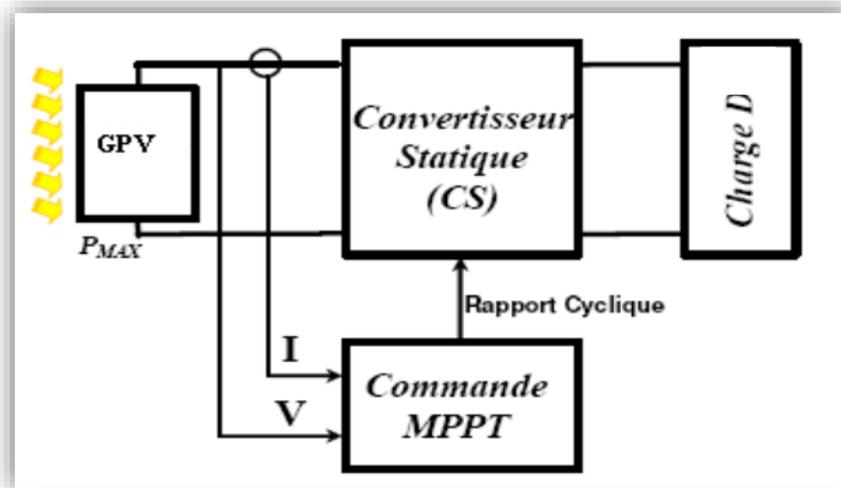


Fig. (II.1) : Schéma de principe du convertisseur MPPT

Dans ce chapitre nous nous intéresserons :

- En première lieu à la modélisation et la simulation du panneau photovoltaïque
- En deuxième lieu à la recherche du MPPT du système photovoltaïque-hacheur avec l'équipement de commande.

II. 2 Modélisation et Simulation d'une cellule photovoltaïque

II.2.1 Modélisation de la cellule photovoltaïque

II.2.1.1 Constitution d'une cellule photovoltaïque

C'est l'élément de base qui grâce à lui la conservation est faite par l'assemblage de plusieurs cellules, on peut atteindre la puissance que l'on veut.

Les photopiles ou cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs ayant des propriétés intermédiaires entre conducteurs et isolants (fig. II.2).



Fig. (II.2) : Cellule photovoltaïque.

Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, polycristalline ou monocristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de gallium (AsGa), Tellure de cadmium (CdTe) [4].

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des "impuretés") sont substitués à des atomes de silicium dans un réseau cristallin : c'est ce que l'on appelle le dopage :

- Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type "N" (ex : dopage au phosphore).
- Si l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le Silicium, le matériau sera déficitaire en électrons : il sera dit de type "P" (ex : dopage au bore).

Une cellule solaire sera obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposées (jonction PN). Au voisinage de la jonction, un champ électrique apparaît provoqué par le déséquilibre de charges. Il va contribuer à drainer les électrons qui auront été détachés par l'énergie des photons (grains de lumière) incidents. Pratiquement, la cellule PV est composée de plusieurs couches minces figure (II.3) à savoir :

- Une couche "antireflet" sur la face avant dont le but est de faciliter au maximum la pénétration d'un maximum de photons à travers la surface et de réduire les pertes par réflexion.
- Une grille conductrice avant " collectrice des électrons " qui doit également être liée au silicium et ne pas être sensible à la corrosion.
- Une couche dopée N avec porteurs de charge libres négatifs (électrons).
- Une couche dopée P avec porteurs de charge positifs (trous).
- Une surface de contact conductrice en métal (collectrice des électrons), ayant une bonne conductivité ainsi qu'un bon accrochage sur le silicium.

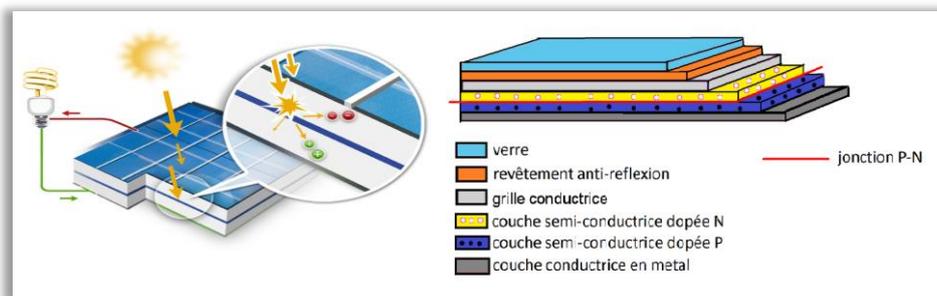


Fig. (II.3) : Description d'une cellule.

II.2.1.2 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). 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 (équation II.1), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron- trou dans différents points de la jonction Figure (II.4).

$$E_g = E_c - E_v \quad (\text{II.1})$$

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 [4].

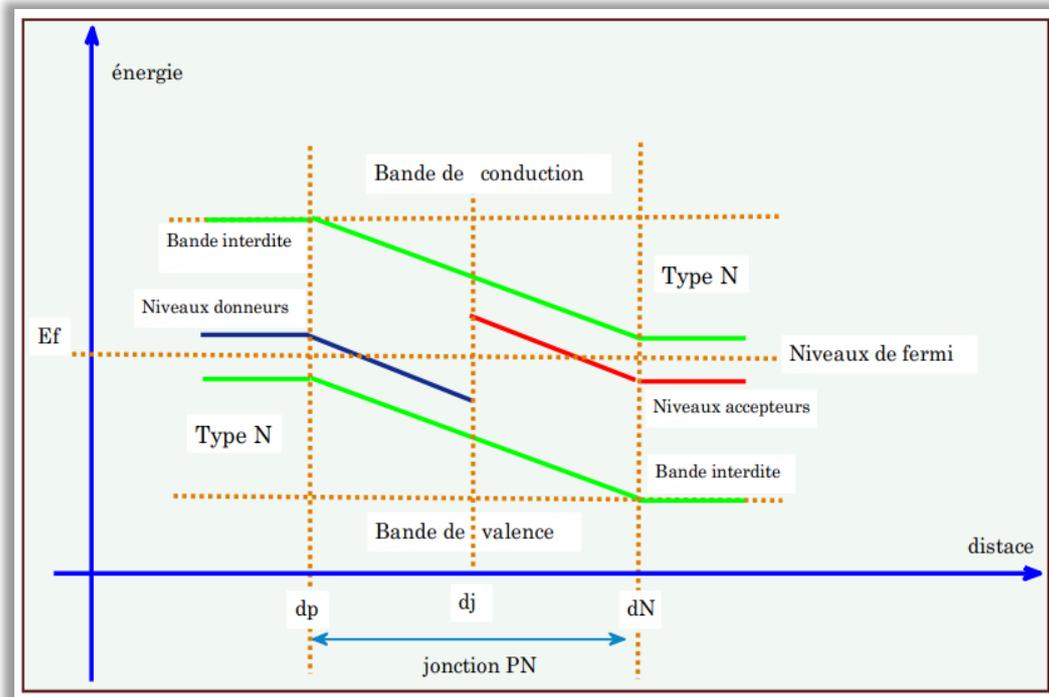


Fig. (II.4) : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction.

Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g , ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de phonons au réseau cristallin puis perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction.

Si les photons ont une énergie inférieure E_g , ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque.

La longueur d'onde correspondant au maximum de photons est de l'ordre de 650nm-650nm. L'expression qui exprime l'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E = h * c / \lambda \quad \text{(II.2)}$$

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte value à Albert Einstein le prix Nobel en 1905.

II.2.1.3 Les différents types des panneaux photovoltaïques

Il existe plusieurs types des panneaux photovoltaïques selon le type de matériaux utilisé dans les constructions :

- Silicium monocristallin
- Silicium poly cristallin
- Silicium amorphe
- Arséniure de gallium
- Tellurure de cadmium
- Silicium en ruban

II.2.1.4 Comparaison du rendement entre les différentes technologies

Type de cellule	Rendement des cellules PV			Domaines d'applications
	Théorique	En laboratoire	Disponibles	
Silicium monocristallin	27,0 %	24,7 %	14,0-16,0 %	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Silicium poly cristallin	27,0 %	19,8 %	12,0-14,0 %	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Silicium amorphe	25,0 %	13,0 %	6,0-8,0 %	Appareils de faible puissance production d'énergie embarquée (calculatrice montres...) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Arséniure de gallium	29,0 %	27,5 %	18,0-20,0 %	Systèmes de concentrateur, espace (satellites).
Tellurure de cadmium	28,5 %	16,0 %	8,0 %	Modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)
Silicium en ruban	27,0 %	27,0 %	9,0-11,0 %	Module non spécifique

Tableau II.1 - Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques

II.2.15 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque qui est largement utilisé est représenté sur la Figure (II.5).

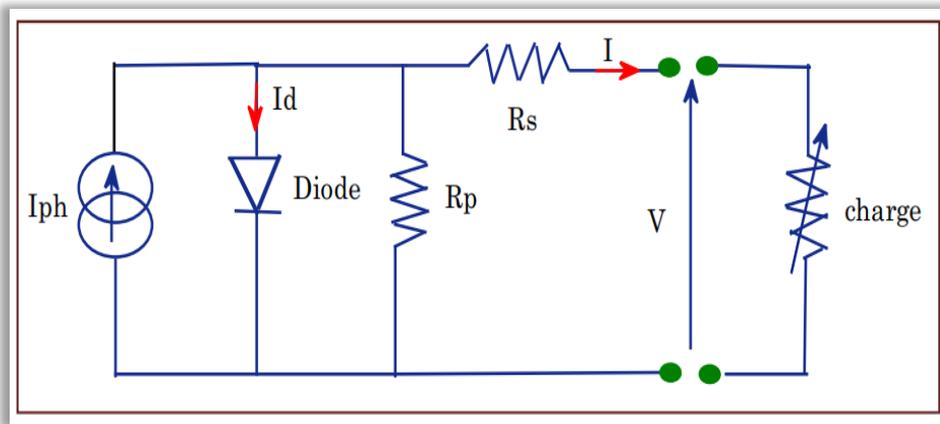


Fig. (II.5) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Comme montre la figure (II.5) une cellule photovoltaïque comporte en réalité une résistance série R_s et une résistance shunt R_p . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la cellule [5] :

- La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

II.2.1.6 Mise en équation de la cellule photovoltaïque

D'après la Figure (II.5) le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$$I_d = I_0 \left(\exp\left[\frac{q}{m.k.T_c} (V + I.R_s) - 1\right] \right) \quad (\text{II.4})$$

Dans la pratique l'équation (II.3) peut être simplifiée. Pour le cas d'une cellule solaire de bonne qualité, on admet que :

- La résistance R_p à une valeur assez élevée. Donc le terme $\frac{V+I.R_s}{R_p} = 0$
- L'expression $\exp\left[\frac{q}{m.k.T_c}(V + I.R_s)\right] \gg 1$

Par conséquent, l'équation courant-tension de la cellule s'écrit donc :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left[\frac{q}{m.k.T_c} (V + I.R_s) \right] \right) \quad \text{(II.5)}$$

II.2.2 Simulation et interprétation des résultats

L'implémentation du modèle de la cellule photovoltaïque dans un code de calcul par Simulink-MATLAB nous permet d'obtenir les différentes caractéristiques de la cellule PV.

II.2.2.1 Caractéristique tension-courant

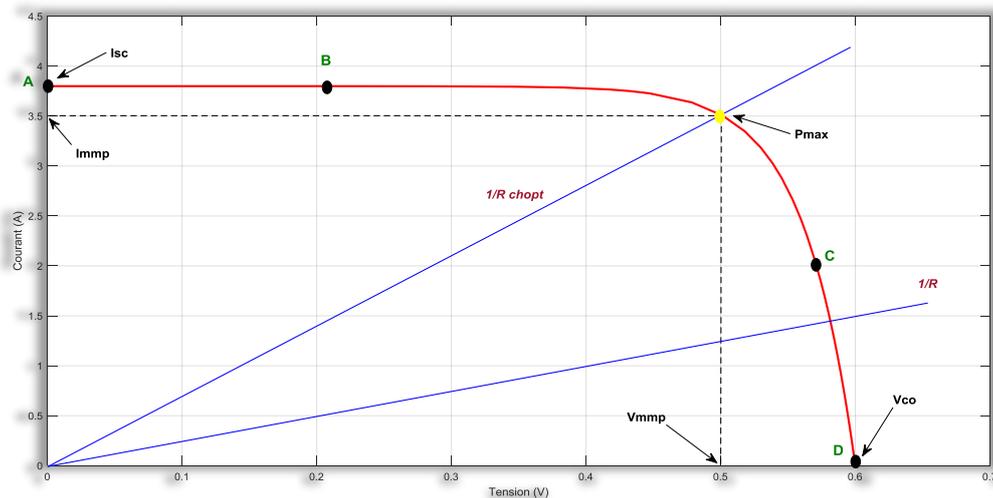


Fig. (II.6) : Caractéristique courant-tension.

La figure (II.6) montre la caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule PV à une température fixée (T_c) et à une certaine ambiante irradiation (G_a).

Si une résistance série variable (R_{chopt}) connectée à la terminale de la cellule, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de la courbe courant-tension et la caractéristique courant-tension de la charge. La caractéristique de la charge résistive est une droite avec $I/V = 1/R_{chopt}$. Si la résistance est petite la cellule fonctionne dans la région A vers B seulement (comme une source de courant constant) et si la résistance est grande, la cellule fonctionne dans la région C vers D de la courbe (comme une source de tension constant) [5].

Les paramètres caractéristiques peuvent être déterminés à partir de la courbe courant-tension.

- **Courant de court-circuit I_{cc}**

C'est la plus grande valeur de courant générée par la cellule sous les conditions de court-circuit où $V=0$. (Pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$)

- **Tension de circuit-ouvert (V_{co})**

C'est la tension pour laquelle le courant débité par le générateur **PV** est nul (la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur **PV**). Son expression est déduite de l'équation suivante :

$$V_{co} = \left(\frac{m \cdot k \cdot T_c}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) = V_{th} \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$$V_{th} = \left(\frac{m \cdot k \cdot T_c}{q} \right) : \text{la tension thermique.}$$

- **Puissance maximale**

C'est la puissance électrique maximale que peut fournir le module, qui est associé à une tension maximale V_m et à une intensité maximale I_m Lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC standard (25° et un éclairement de 1000 w/m², on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête.

- **Facteur de forme (FF)**

C'est le rapport de la puissance maximale qui peut être délivré à la charge sur le produit de (I_{cc} , V_{co})

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (\text{II.7})$$

Pour les cellules ayant moyen rendement, le FF prend des valeurs d'ordre 0.7 à 0.85. Le facteur de forme FF diminue si la température augmente.

- **Rendement de la conversion**

C'est le rapport de la puissance électrique maximale pouvant être extraite, à la puissance de rayonnement incident (P_{inc}) sur la surface X de la cellule.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{S \cdot G_a} = \frac{V_{co} \cdot I_{cc} \cdot FF}{P_{inc}} \quad (\text{II.8})$$

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

III.2.2.2 Caractéristique puissance-tension et puissance-courant

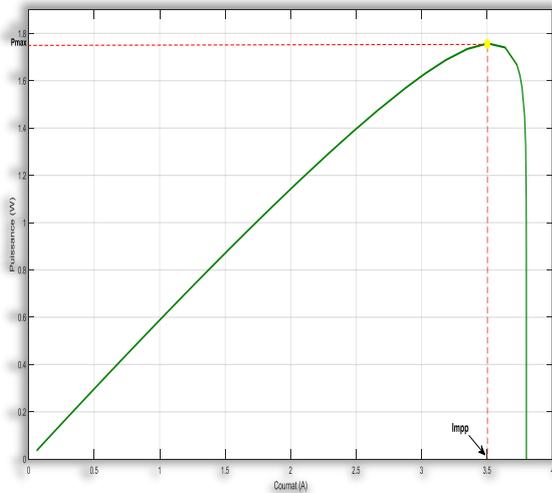


Fig. (II.7) : caractéristique
Puissance-courant.

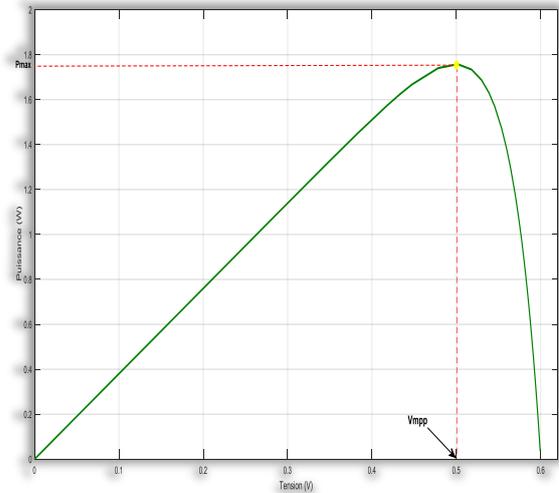


Fig. (II.8) : caractéristique
Puissance-tension.

II.2.2.3 Effets extérieur et intérieur sur les grandeurs électriques de la cellule

a) Effets extérieurs

- Effet de variation de l'éclairement

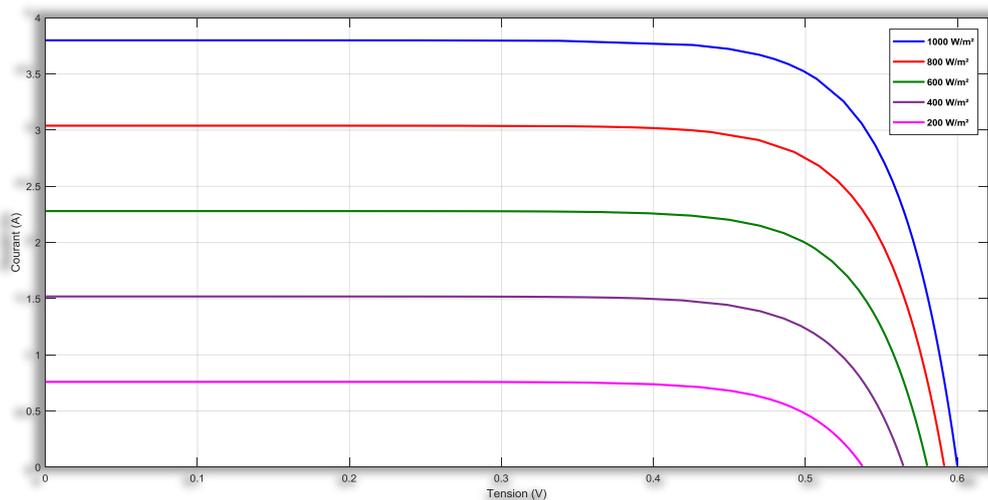


Fig. (II.9) : Effet de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure (II.9) représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en

fonction de l'éclairement, à une température constante. Le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement [6].

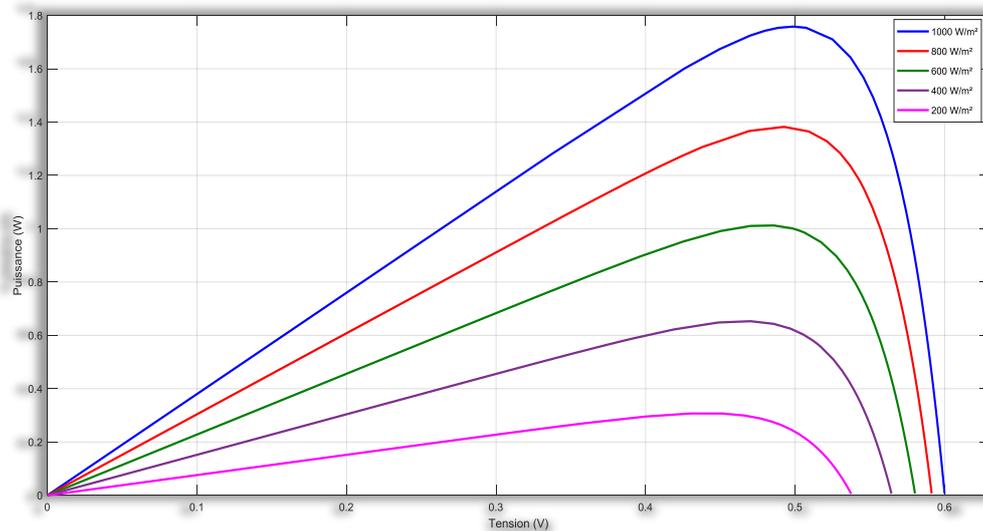


Fig. (II.10) Effet de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$

La figure (II.10) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'effet de l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$

- **Effet de la température**

L'effet de la température est important 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, il 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).

$$T_c = T_a + \frac{E_m}{1000} (T_{uc} - 25) \quad \text{(II.9)}$$

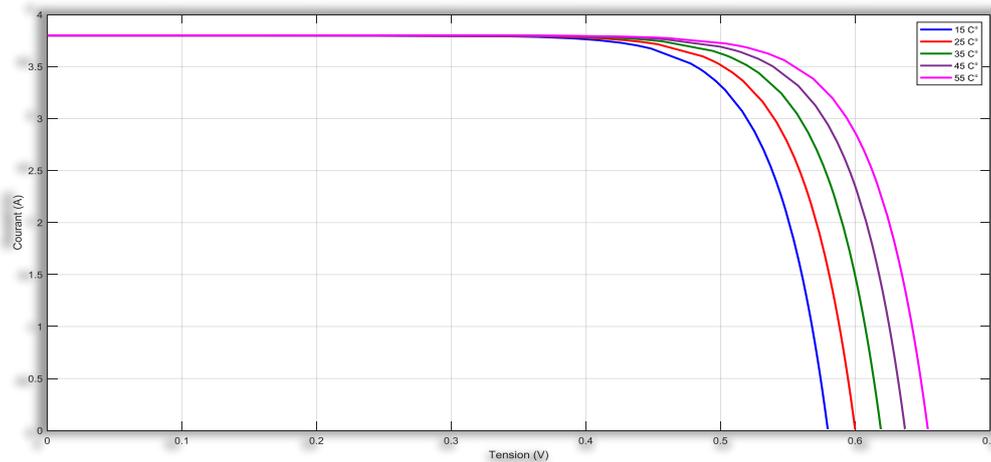


Fig. (II.11) Effet de la température sur la caractéristique $I=f(V)$

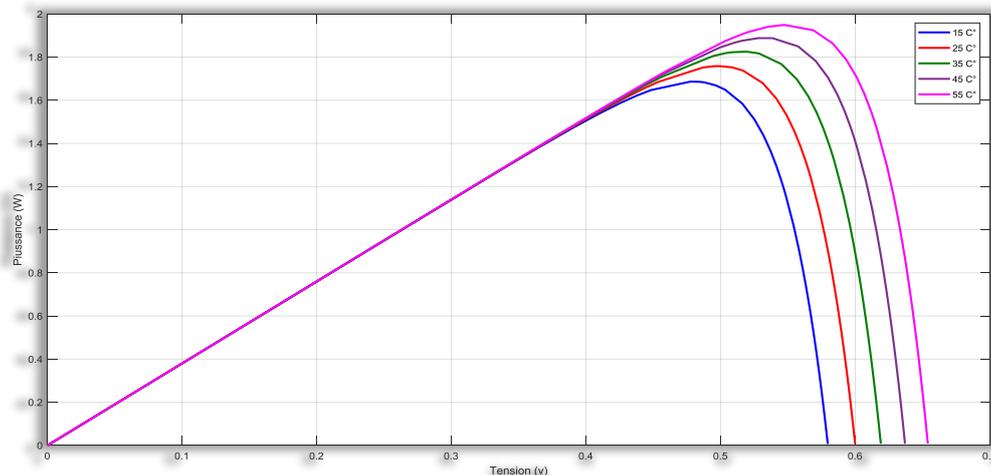


Fig. (II.12) : Effet de la température sur la caractéristique $P=f(V)$

La figure (II.11), montre l'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$. Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique $I=f(V)$.

Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution [6].

La figure (II.12) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

b) Effets intérieurs

- **Variation de la résistance série (R_s)**

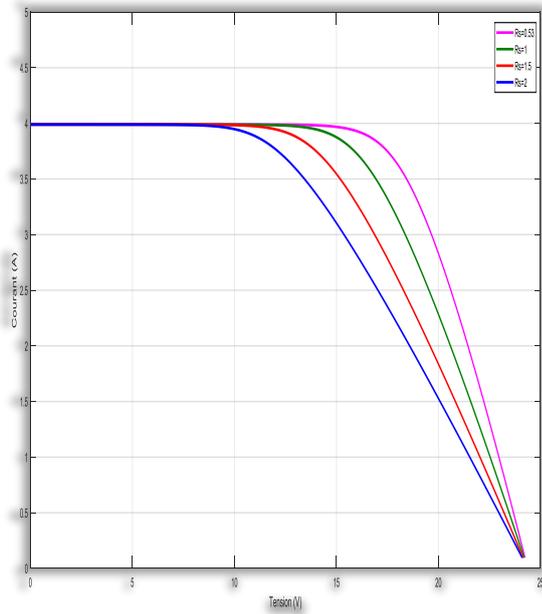


Fig. (II.13) Effet de la variation de R_s sur la caractéristique $I=f(V)$

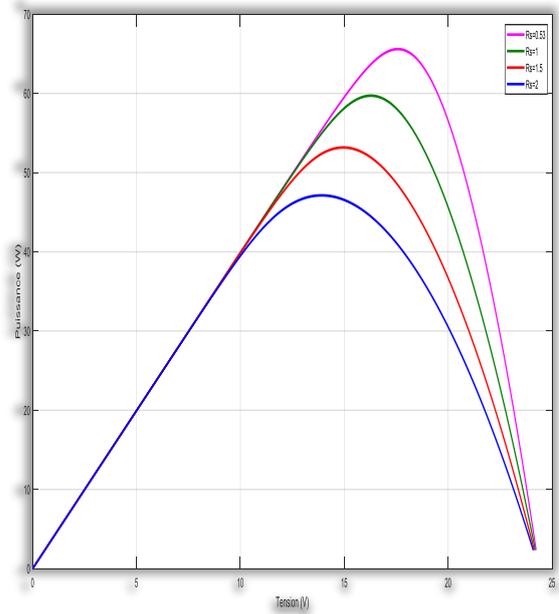


Fig. (II.14) Effet de la variation de R_s sur la caractéristique $P=f(V)$

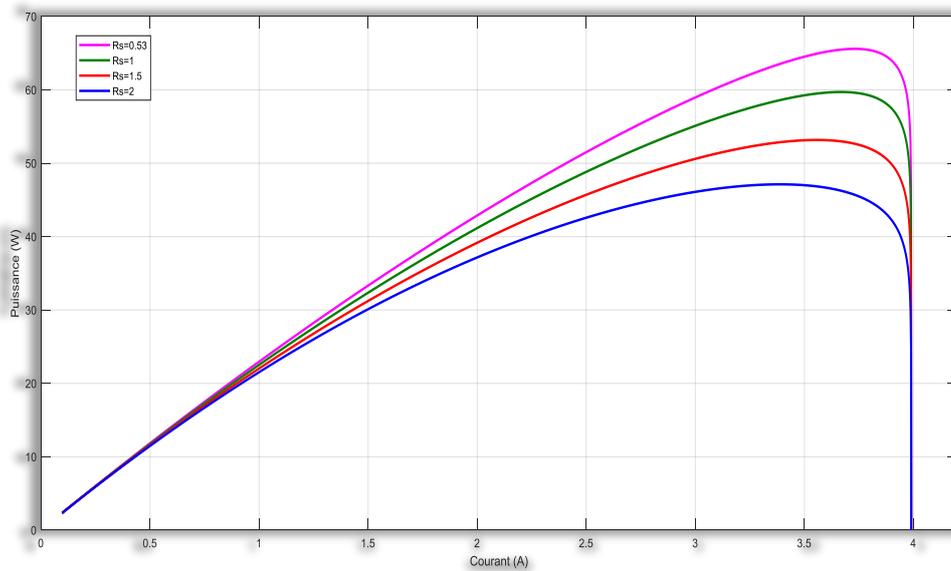


Fig. (II.15) Effet de la variation de R_s sur la caractéristique $P=f(I)$

• Variation de la résistance parallèle (R_p)

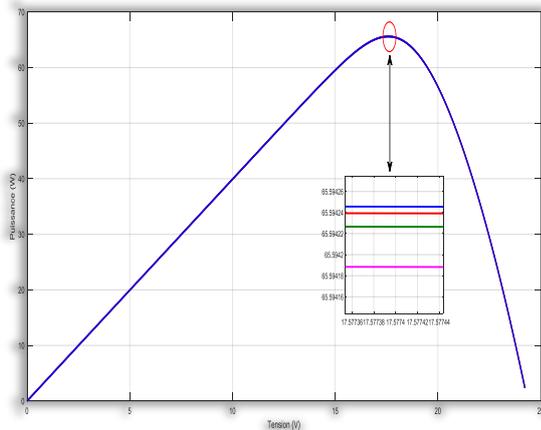


Fig. (II.16) Effet de la variation de R_p sur la caractéristique $P=f(V)$

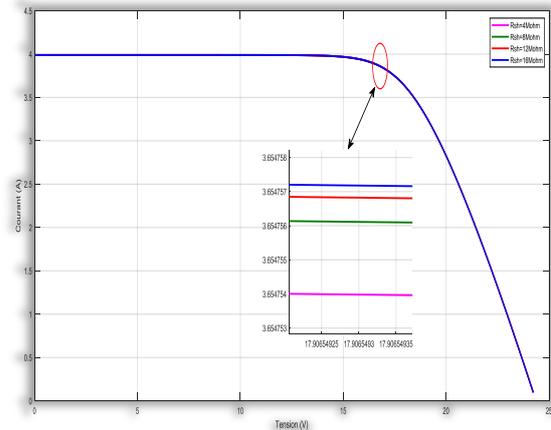


Fig. (II.17) Effet de la variation de R_p sur la caractéristique $I=f(V)$

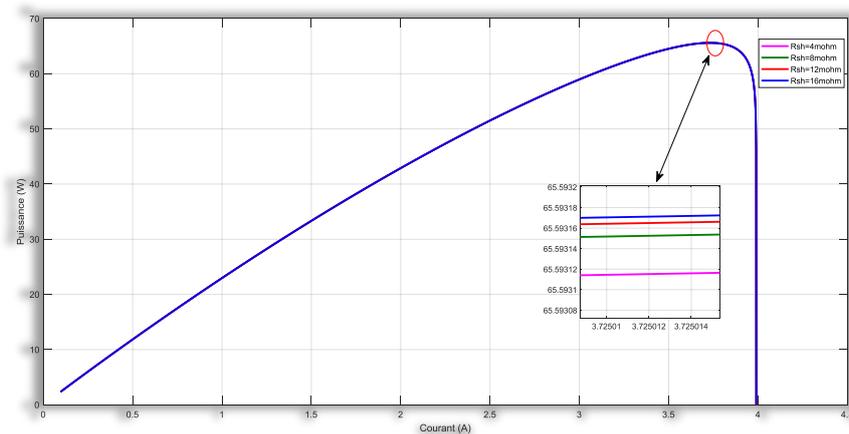


Fig. (II.18) Effet de la variation de R_p sur la caractéristique $P=f(I)$

On remarque une légère influence de la variation de R_p sur les grandeurs électriques de la cellule photovoltaïque.

II.2.2.4 Différents types de connexions des cellules photovoltaïques

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées soit en série ou parallèle pour former un module (ou panneau) [7].

• Association série des cellules PV

L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [7].

$$V_{cos} = N_s * V_{co} \tag{II.10}$$

La caractéristique d'un groupement de Ns modules solaires en série est représentée par la figure suivante :

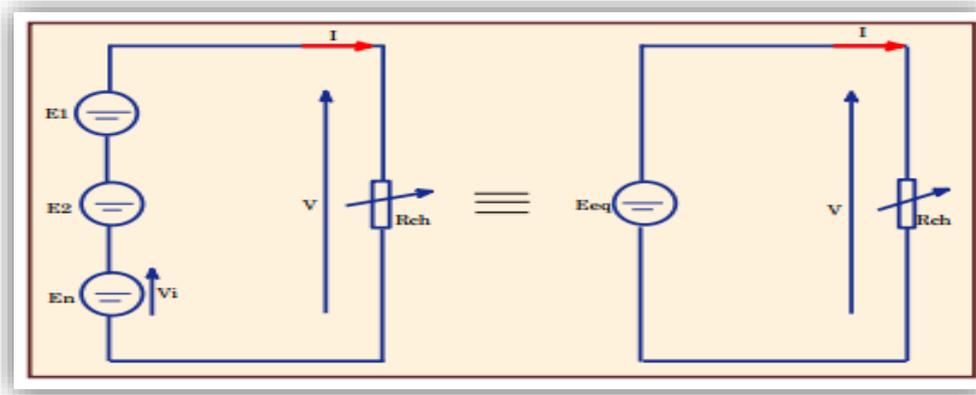
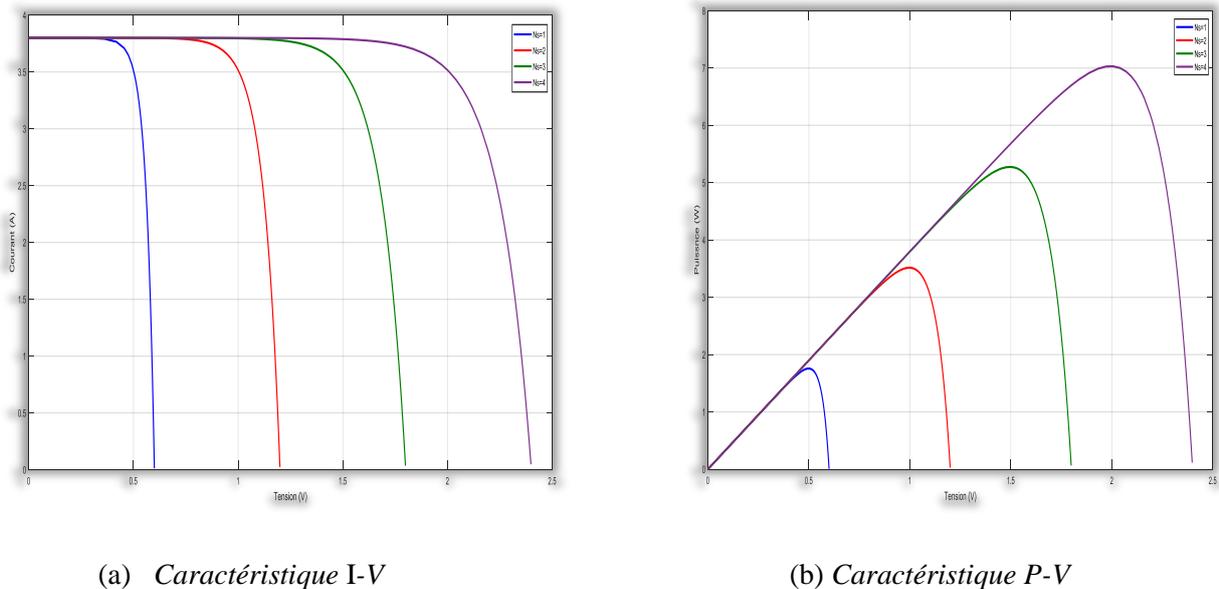


Fig. (II.19) : Association de Ns modules solaires en série

Pour obtenir une tension compatible avec la charge et pour avoir plus de tension, il faut assembler Ns modules en série,



(a) Caractéristique I-V

(b) Caractéristique P-V

Fig. (II.20) : Association série des cellules solaire

• Association parallèle des cellules PV

L'association en parallèle des photopiles délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celui d'une seule cellule [7].

$$I_{ccp} = N_p * I_{cc} \tag{II.11}$$

La caractéristique d'un groupement de N_p modules solaires en parallèle est représentée par la figure suivante :

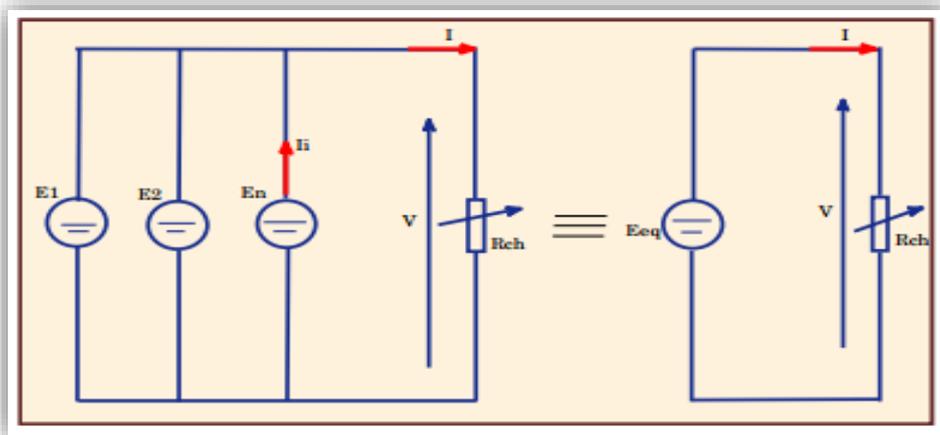
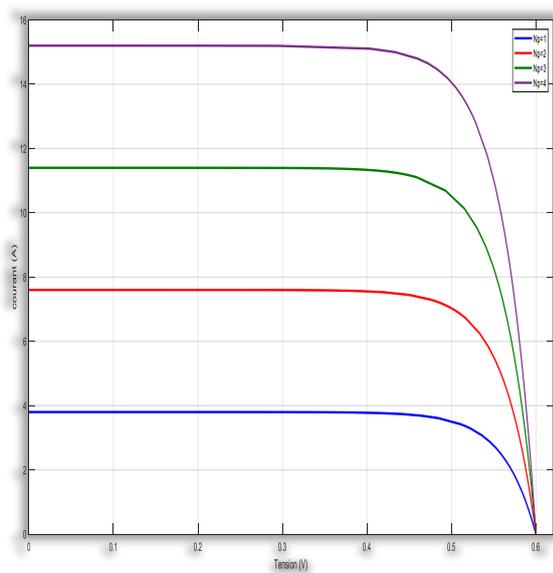
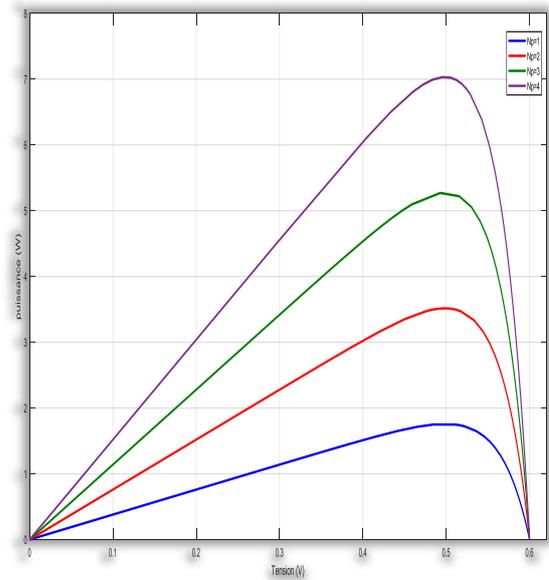


Fig. (II.21) : Association de N_p modules solaires en parallèle



(a) Caractéristique I-V



(b) Caractéristique P-V

Fig. (II.22) : Association parallèle des cellules solaire

• Association mixte (Série + Parallèle) des cellules PV

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle [7].

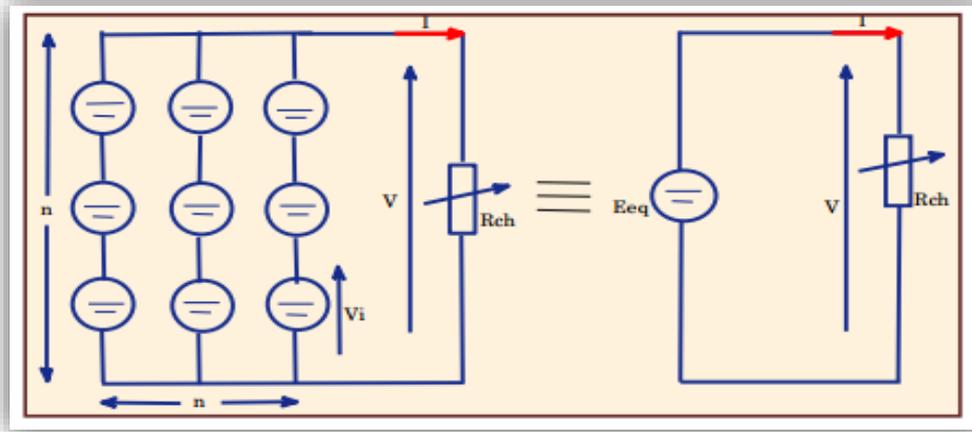
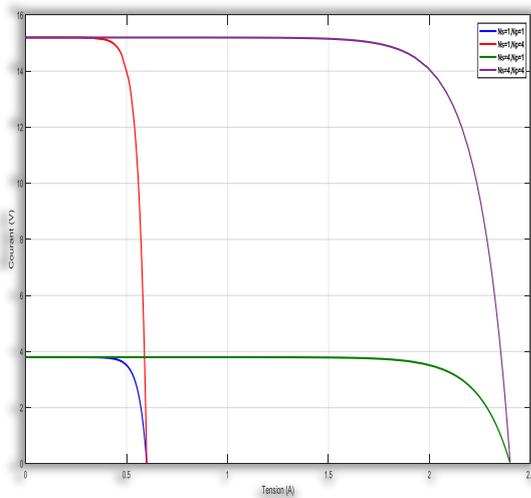
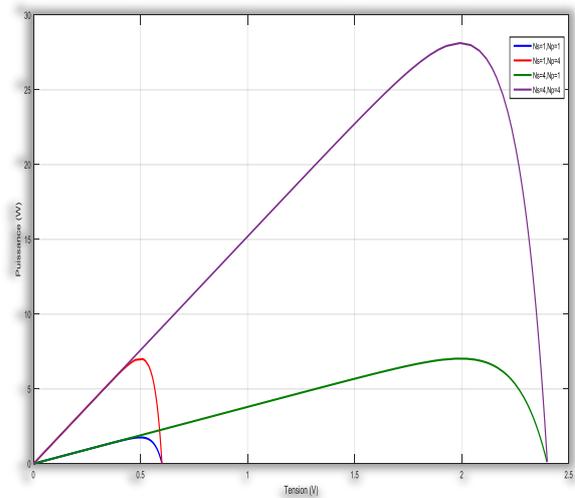


Fig. (II.23) : Association mixte $N_s \times N_p$ modules solaires



(a) Caractéristique I-V



(b) Caractéristique P-V

Fig. (II.24) : Association mixte des cellule solaires

D'après la figure on remarque que la puissance du regroupement mixte est supérieure par rapport aux autres types de connexion.

II.3. Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

Il existe un point de fonctionnement où la puissance débitée est maximale (figure II.25). L'optimisation consiste à réaliser ce point en permanence en agissant de façon automatique sur la charge vue par le générateur cette adaptation de charge dans le principe s'effectue en générale à l'aide d'un convertisseur statique dans les pertes doivent être aussi faibles que possible et qui peut, par ailleurs, assurer une fonction de mise en forme d'une générateur de sortie, différentes attitudes peuvent être envisagées quant à la commande de l'adaptateur.

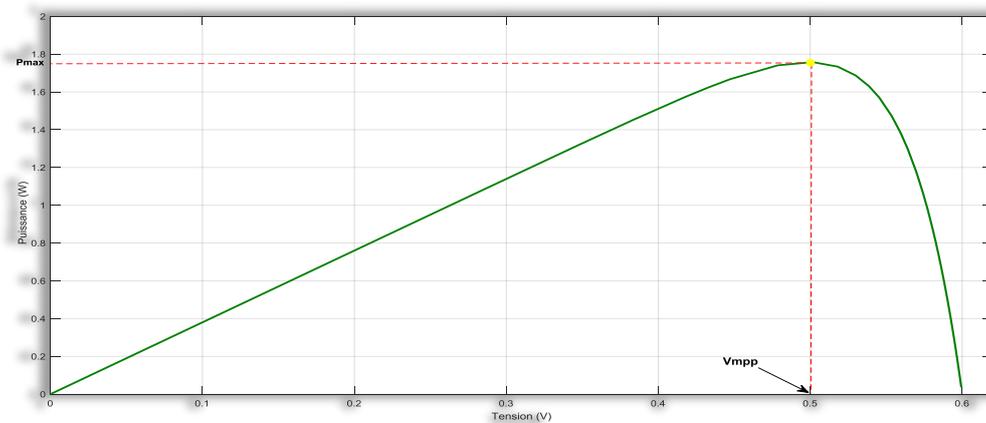


Fig. (II.25) Courbe caractéristique de puissance d'un GPV

Ce type de commande est souvent nommé « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking (MPPT) ». La figure (II.26) représente une chaîne élémentaire de conversion solaire élémentaire associée à une commande MPPT.

L'adaptateur peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC (CS) de telle sorte que la puissance fournie par le Générateur Solaire (GS) corresponde à la puissance maximale (Pmax) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge [8, 9, 10].

II.3.1 Les Convertisseurs DC-DC (Les Hacheurs)

Les hacheurs présentent la partie essentielle dans le dispositif de commande d'un générateur photovoltaïque, ils sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle figure (II.26), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues. La figure (II.26) rappelle le schéma de principe d'un convertisseur DC-DC.

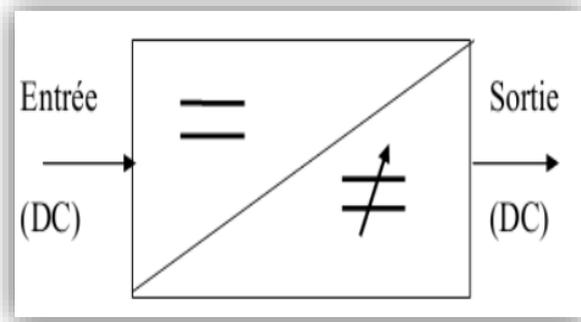


Figure. (II.26) Schéma de principe de l'hacheur.

II.3.2 Comparaison entre les différents types de convertisseur DC-DC

Il existe plusieurs types des Hacheurs DC-DC. (Tableau) Parmi les quels, 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 [11].

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.2) Comparaison les principaux convertisseurs DC-DC

II. 3.3 Hacheur survolteur (boost) : modélisation et simulation

a) Principe de fonctionnement et circuit équivalent

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension, abaisseur de courant. Le schéma ci-dessous représente le circuit électrique du Boost. Durant le temps de conduction, le transistor k est fermé, le courant dans l'inductance croit 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.

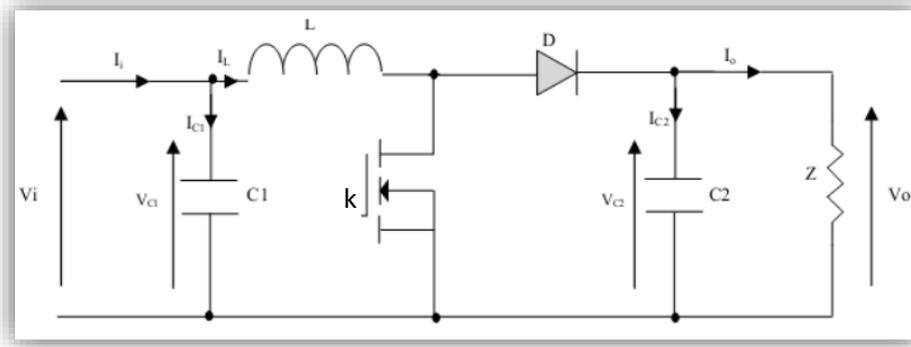


Fig. (II.27) Circuit électrique de l'hacheur Boost.

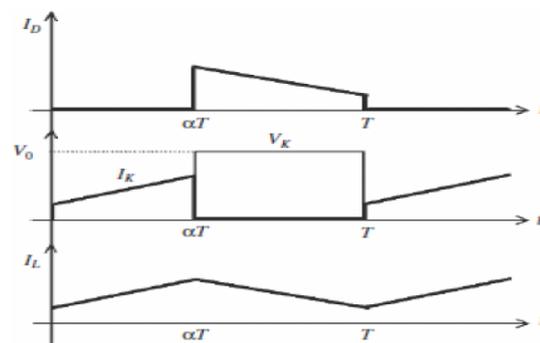


Fig. (II. 28) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

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 (II.29, II.30) donnent les équations suivantes :

Pour la première période αT :

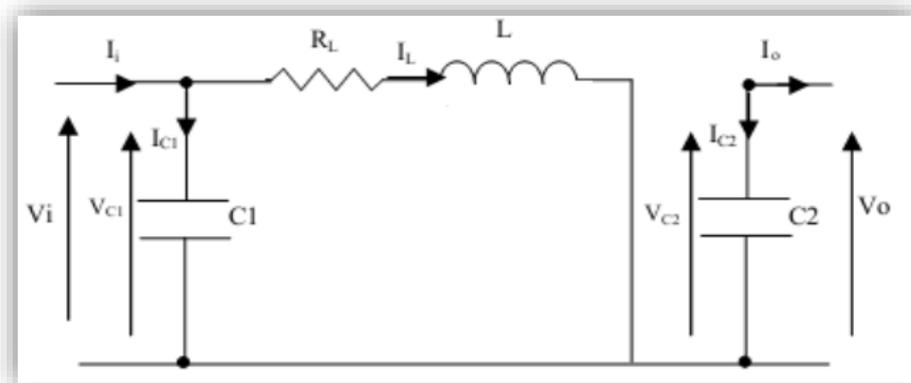


Fig. (II.29) Circuit équivalent du Boost lorsque S fermé.

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1} = c_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_l \\ i_{c2} = c_2 \frac{dv_o}{dt} = -i_o \\ v_l = L \frac{di_l}{dt} = -v_i \end{array} \right. \quad (II.12)$$

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

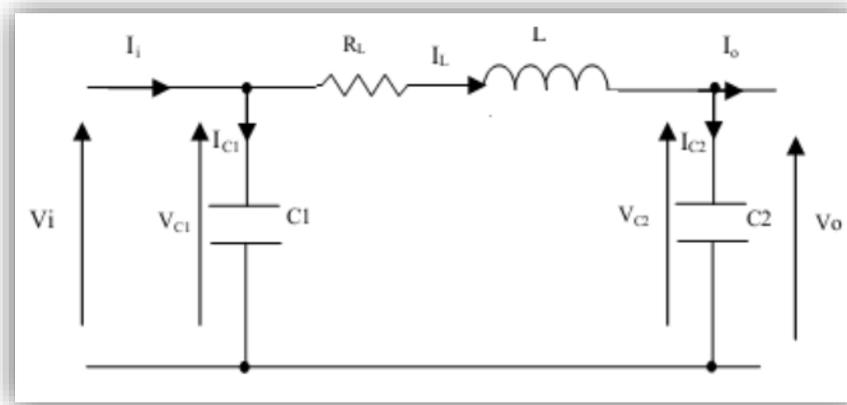


Fig. (II.30) Circuit équivalent du Boost lorsque S ouvert.

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1} = c_1 \frac{dv_i}{dt} = i_i - i_l \\ i_{c2} = c_2 \frac{dv_o}{dt} = i_l - i_o \\ v_l = L \frac{di_l}{dt} = v_i - v_o \end{array} \right. \quad (II.13)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} i_l = i_i - c_1 \frac{dv_i}{dt} \\ i_o = (1 - \alpha)i_l - c_2 \frac{dv_o}{dt} \\ v_i = (1 - \alpha)v_o + L \frac{di_l}{dt} \end{array} \right. \quad (II.14)$$

c) Conception d'un hacheur Boost

Les valeurs des composants à choisir sont calculées comme suit :

$$L = \frac{v_i \cdot \alpha}{f \cdot \Delta i_i} \tag{II.15}$$

$$C_2 = \frac{v_i \cdot \alpha}{f \cdot R_{ch} \cdot \Delta v_0 (1 - \alpha)} \tag{II.16}$$

$$C_1 = \frac{i_i - i_l}{2 \cdot \Delta v_i} \tag{II.17}$$

II.3.4 Simulation

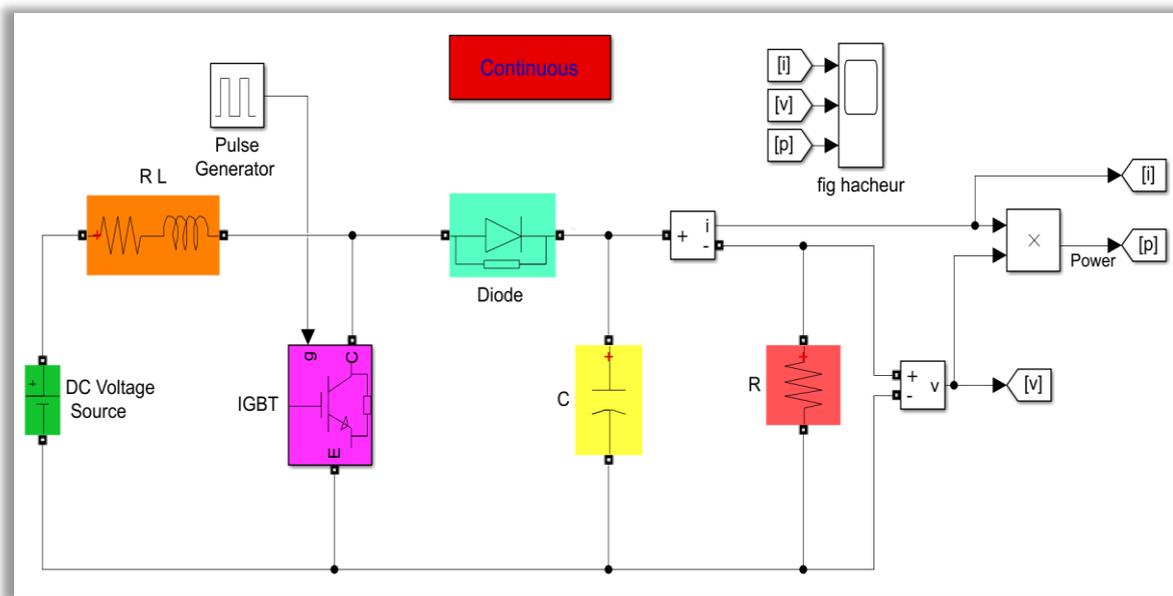


Fig. (II.31) schéma bloc d'un hacheur boost.

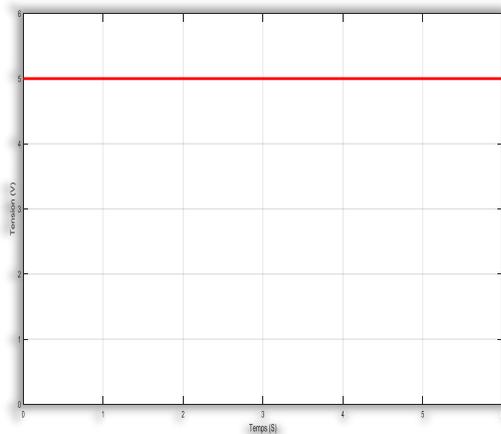


Fig. (II.32) Tension d'entrée de l'hacheur.

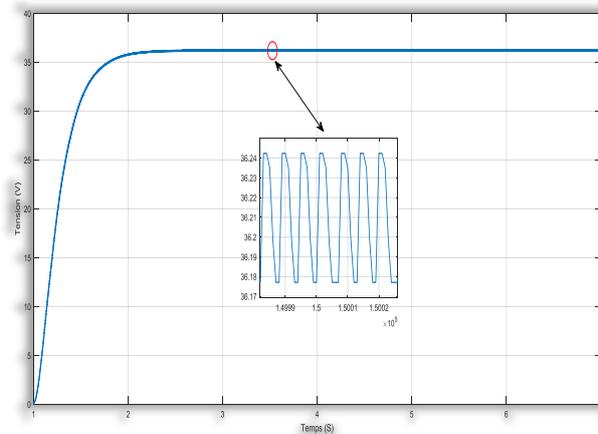


Fig. (II.33) Tension de sortie de l'hacheur.

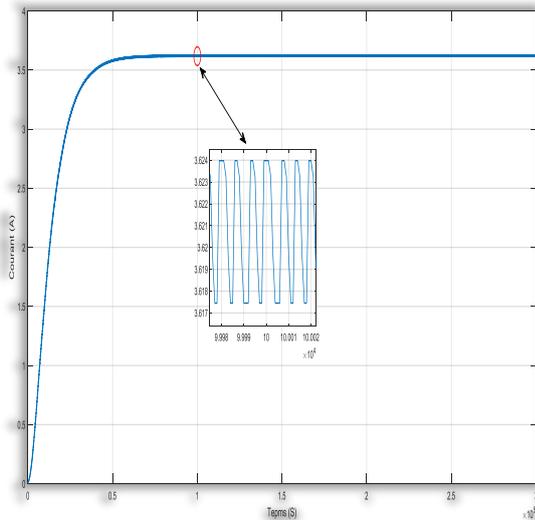


Fig. (II.34) courant de sortie de l'hacheur.

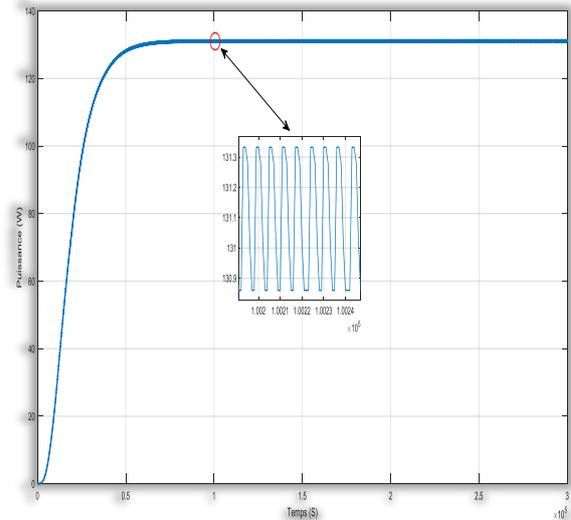


Fig. (II.35).la puissance de sortie de l'hacheur.

D'après les figures (fig.II.33, 34 et 35) on remarque que les valeurs de tension, courant et puissance de sortie d'hacheur est supérieur à la source de tension continu car la commande impose un rapport cyclique α .

II.3.5 Différents techniques de recherche du point de fonctionnement optimale

La définition mathématique de l'optimum d'une fonction est le point par lequel sa dérivée par rapport à une variable donnée s'annule. Tous les algorithmes de calcul du point de puissance maximum consultés se basent sur ce principe.

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM. Dans notre travail on s'intéresse par deux méthodes *Perturb & Observ* (*P&O*), *Incrémentation de la Conductance* (*INC*) nous rappelons brièvement les principes de ces méthodes.

II.3.5.1 Algorithme perturbation et observation (P&O)

La méthode de (P&O) est une approche largement répandue dans le domaine des techniques *MPPT*, due à sa simplicité. Elle exige seulement des mesures sur la tension de sortie du (GS) et son courant de sortie. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne par la perturbation de la tension (V)du système par l'augmentation ou la diminution de la tension du générateur en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC) puis l'observation de l'effet sur la puissance du (GS).

Le principe des commandes MPPT de type (P&O) consiste à perturber la tension (V_{GS}) d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance (P_{GS}), comme l'illustre la figure (II.36) dans le cas de (GPV), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension (V_{GS}) engendre un accroissement de la puissance (P_{GS}), cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du *MPPT*.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le *MPPT*. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{GS} = f(V_{GS})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au *MPPT*, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance (GS) augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau *MPPT*.

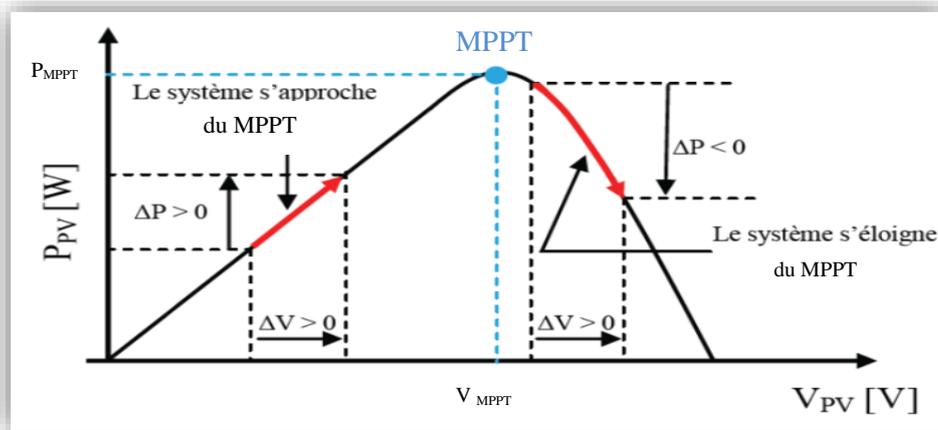


Figure. (II.36) Caractéristique $P_{GS}(V_{GS})$ d'un panneau solaire GPV.

La figure (II.37) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type (P&O), où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

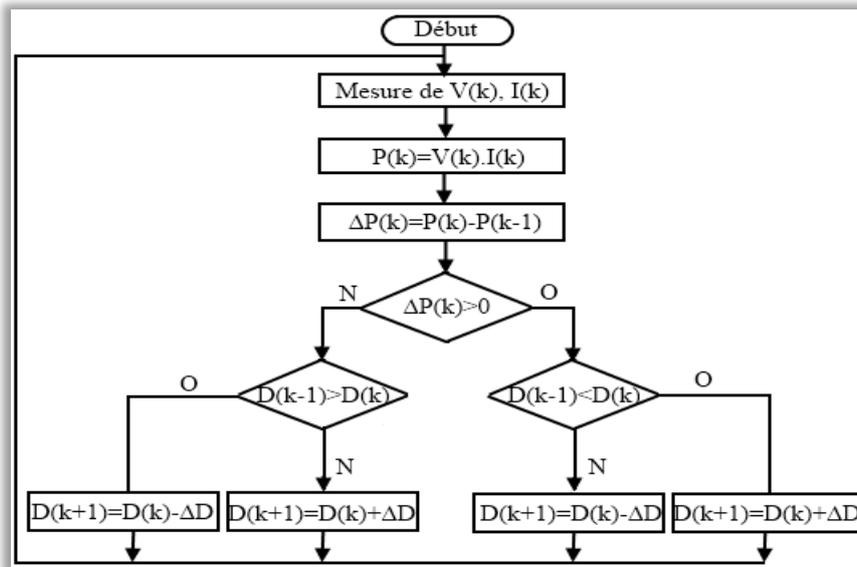


Fig. (II.37) Algorithme type de la méthode P&O.

Si plus généralement, on désire suivre le point de puissance maximale en s'affranchissant de la connaissance des paramètres qui modifient sa position, on doit recourir aux techniques d'asservissement, en utilisant la plus souple, celle de la perturbation et de l'observation, (P&O).

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

II.3.5.2 Algorithme incrémental de la conductance (INC)

Dans cet algorithme, on calcule la dérivée de la puissance de sortie du panneau. Cette dérivée est nulle au point de puissance maximale, positive à gauche et négative à droite du point MPPT [12, 13, 14].

La puissance du GS (GPV) est :

$$\begin{cases} P = VI \\ \frac{dP}{dV} = 0 \dots \dots P = P_{max} \\ \frac{dP}{dV} < 0 \dots \dots P < P_{max} \end{cases} \quad (II.18)$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \dots \dots \dots P > P_{max} \tag{II.19}$$

La dérivée partielle dV/dP est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \approx I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \tag{II.20}$$

Alors, l'équation (II.18) peut être écrite comme suit

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \dots \dots \dots P = P_{max} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} 0 \dots \dots \dots P < P_{max} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \dots \dots \dots P > P_{max} \end{array} \right. \tag{IV.21}$$

Le MPP peut donc être poursuivi en comparant la conductance instantanée ($g = I / V$) à l'incrément de la conductance ($\Delta g = \Delta I / \Delta V$), comme le montre l'organigramme de la figure (II.37) V_{ref} est la tension de référence pour laquelle le panneau GS est forcé à fonctionner. Au MPPT, $V_{ref} = V_{MPPT}$ Une fois que le MPPT est atteint, le point de fonctionnement correspondant est maintenu, à moins qu'un changement dans ΔI est noté, indiquant un changement des conditions atmosphériques et donc du MPPT.

L'algorithme augmente ou diminue V_{ref} pour suivre le nouveau MPPT. La taille de l'incrément détermine la rapidité de la poursuite du MPPT. Une poursuite rapide peut être obtenue avec un incrément plus grand, mais le système ne pourrait pas fonctionner exactement au MPPT et oscille autour de celui-ci. Il y a donc, comme pour la méthode P&O, un compromis entre rapidité et précision. Cette méthode peut être améliorée en amenant le point de fonctionnement près du MPPT dans une première étape, puis d'utiliser l'algorithme I_{NC} pour suivre exactement le MPPT dans une deuxième étape. Généralement, le point de fonctionnement initial est réglé pour correspondre à une charge résistive proportionnelle au rapport de la tension de circuit ouvert V_{OC} sur le courant de court-circuit I_{cc} .

Ces deux solutions assurent que le vrai MPP est poursuivi s'il existe plusieurs maxima locaux. Une manière moins évidente pour effectuer la méthode INC est d'utiliser conductance instantanée et l'incrément de la conductance pour générer un signal d'erreur [12,14].

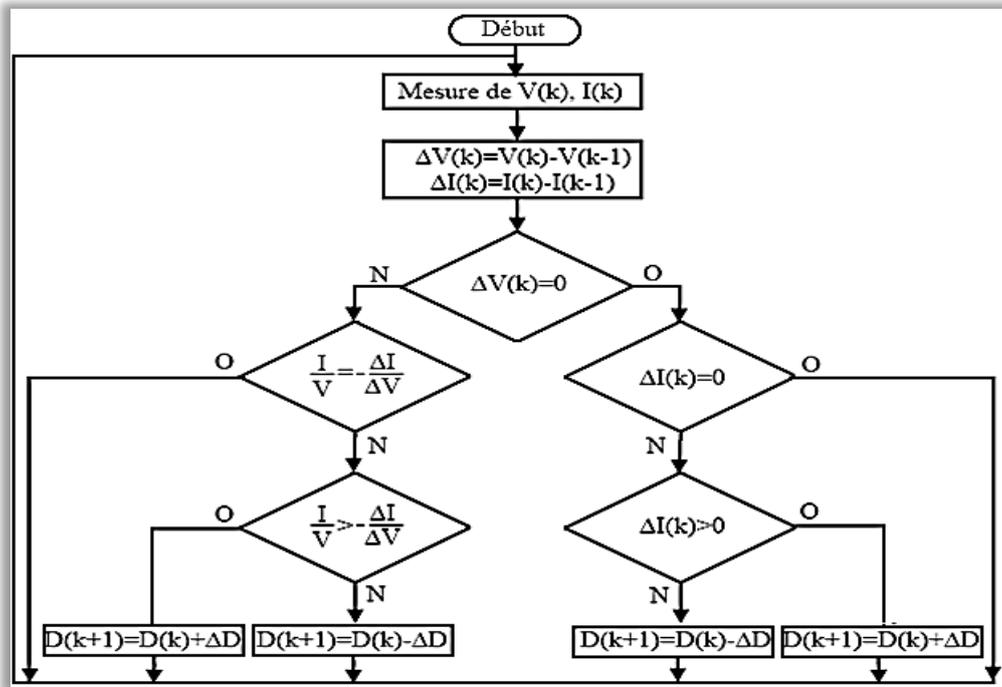


Fig. (II.38) Algorithme type de la méthode INC.

II.3.5.3 Autres méthodes

Il existe dans la littérature d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel à des techniques nouvelles On peut citer :

- Les algorithmes basés sur la logique floue [14, 15, 16,17].
- Les algorithmes à base de réseau de neurones [14].
- Les algorithmes d'identification en temps réel du MPPT [18].
- Dans le cas où la charge est une batterie, il existe un algorithme qui vise à maximiser uniquement courant de charge puisque la tension en sortie est constante. Cet algorithme fait ainsi appel à un seul capteur ce qui réduit considérablement le coût.
- L'algorithme de la capacité parasite (Parasitique Capacitance) [13].
- La méthode d'oscillation forcée [12,19].

II.3.5.4 Critères de qualité d'une commande MPPT

Pour savoir si un gain est apporté par l'utilisation d'une commande MPPT d'un type ou d'un autre, des critères de qualité sont utilisés. Dans un premier temps, la commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et un coût raisonnable. De plus, concernant ses performances, la commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique et en statique pour assurer une adaptation rapide aux changements climatiques. Elle doit aussi pouvoir piloter l'étage d'adaptation de telle sorte qu'en régime statique, le point de fonctionnement du GS soit le plus près possible du MPPT dans n'importe quelle condition météorologique ou état de la charge alimentée. Aussi, la stabilité et la robustesse du système doit être assurée.

En résumé, l'utilisation d'un type de commande MPPT par rapport à une connexion directe doit apporter un gain énergétique et économique quantifiable. Il est important de préciser qu'il n'existe pas de standard international qui définisse comment il faut mesurer les performances d'une commande MPPT [20].

II.3.6 Simulation du système PV-Hacheur avec la commande MPPT

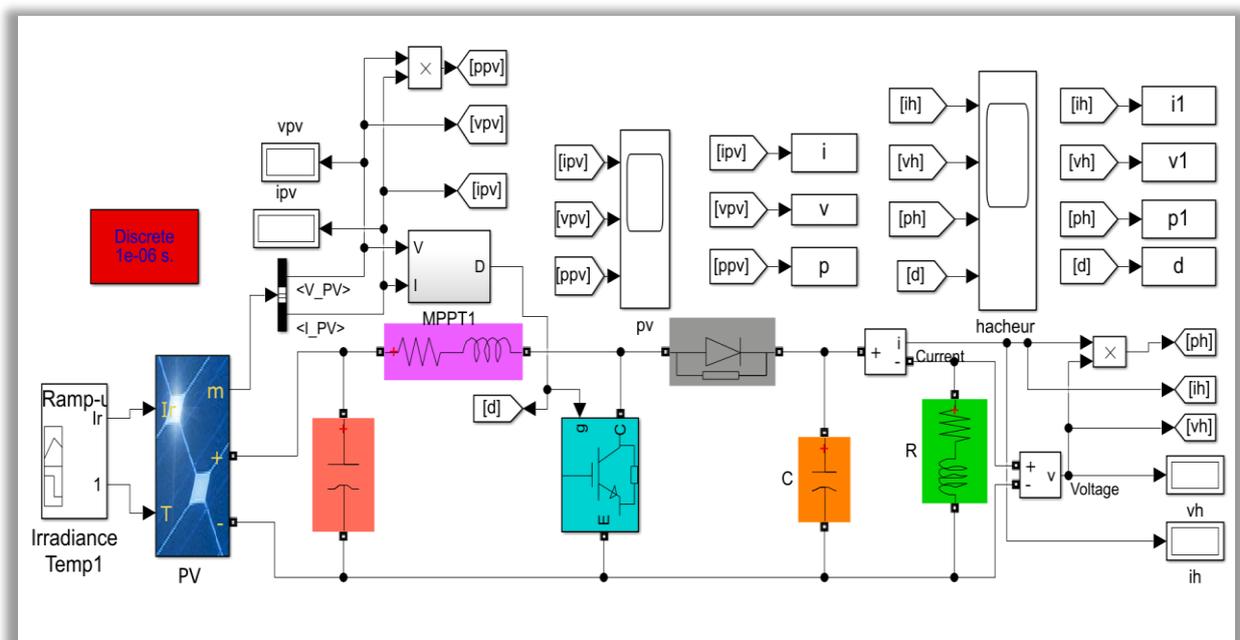


Fig. (II.39) Schéma de simulation de panneaux photovoltaïques avec un hacheur boost.

**II.3.6.1 Modèle avec irradiation et température constante
($G=1000\text{w/m}^2$, $T=25\text{c}^\circ$)**

a) Sortie de photovoltaïque

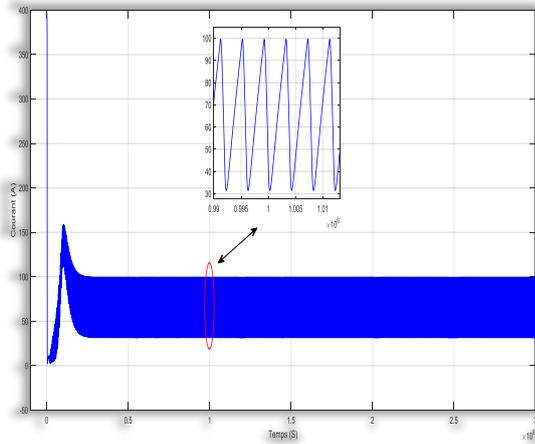


Fig. (II.40) variation temporele du courant.

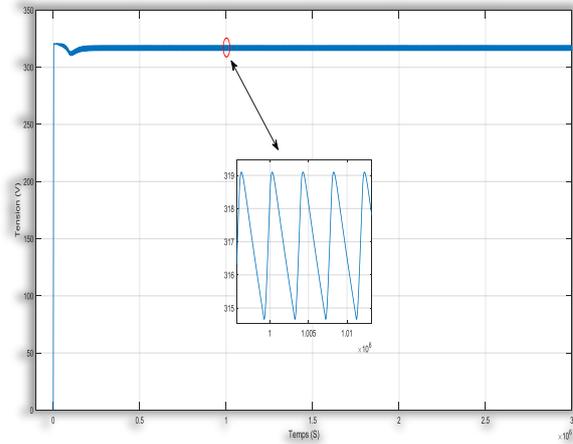


Fig. (II.41) variation temporele de la tension.

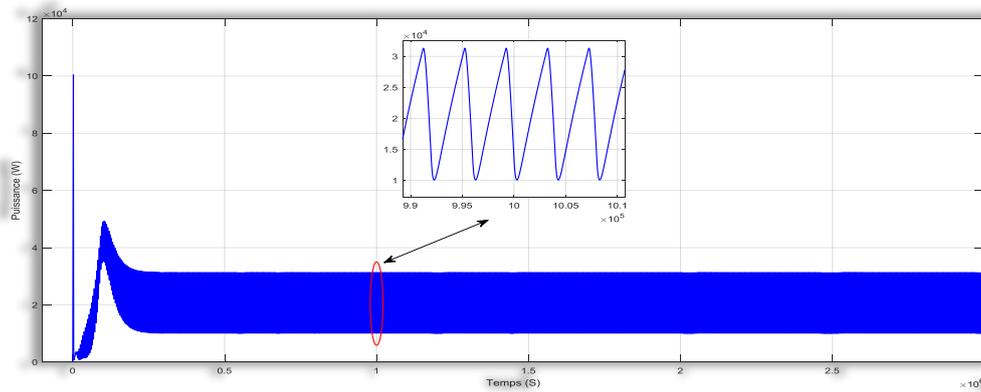


Fig. (II.42) variation temporele de la puissance.

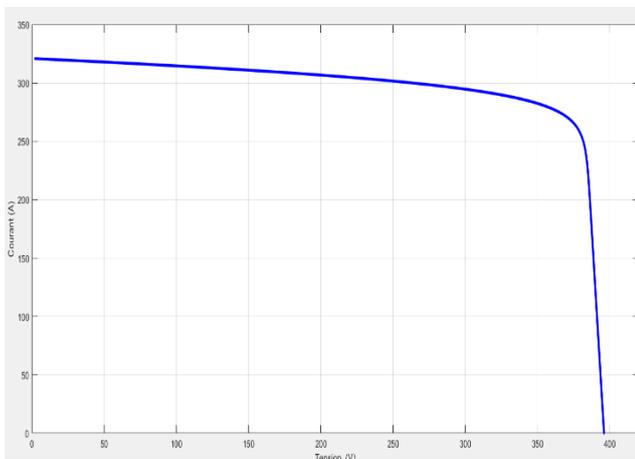


Fig. (II.43) caractéristique I-V

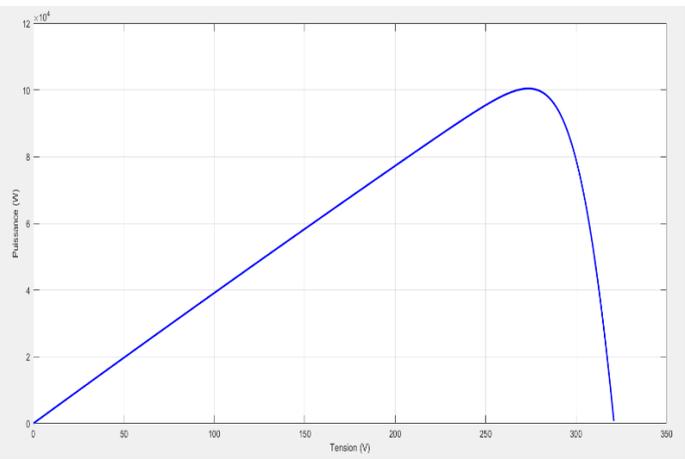


Fig. (II.44) Caractéristique P-V

D'après la figure (fig.II.41), au départ la tension de PV prend un saut pour qu'elle se stabilise à la valeur désirée. D'après la figure (fig.II.40), on remarque qu'au départ le courant prend la valeur de court-circuit ensuite il prend la valeur nominale. Dans la figure (fig.II.42) on remarque que le générateur PV fonctionne en puissance maximale.

b) Sortie de l'hacheur

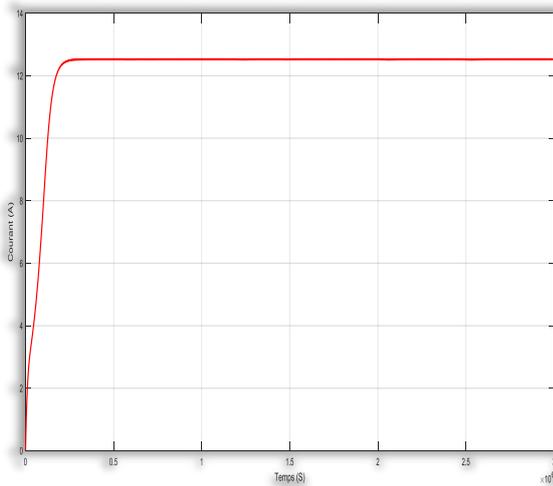


Fig. (II.45) variation temporelle du courant.

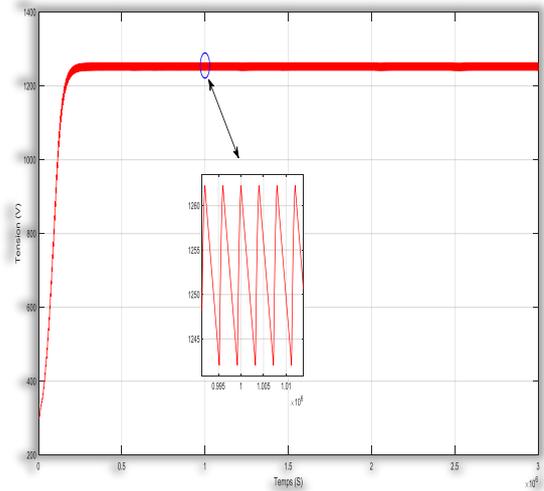


Fig. (II.46) variation temporelle de la tension.

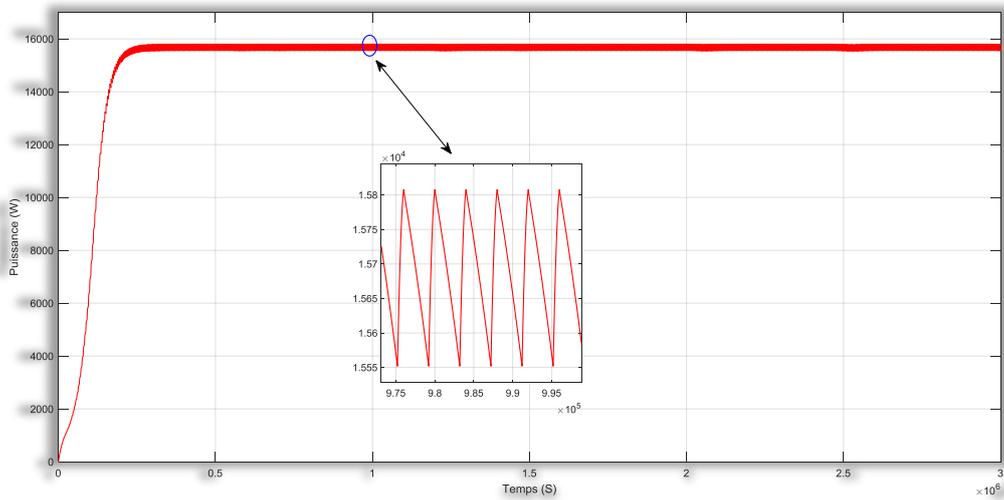


Fig. (II.47) variation temporelle de la puissance.

D'après les figures (fig.II.45, 46 et 47) on remarque que les valeurs de tension, courant et puissance de sortie d'hacheur est inférieure à celles de PV car la commande MPPT impose un rapport cyclique $0.4 > D$.

II.3.6.2 Modèle avec température variable et irradiation variable

a) Température variable

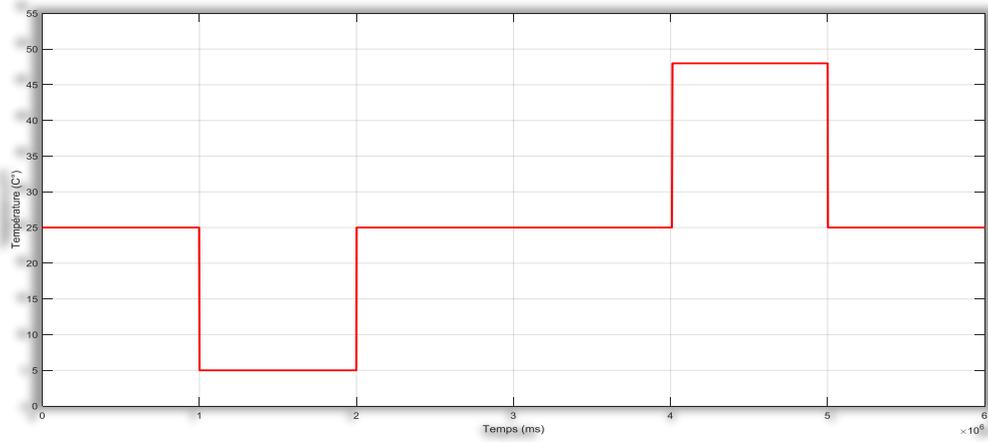


Fig. (II.48) La variation de la température.

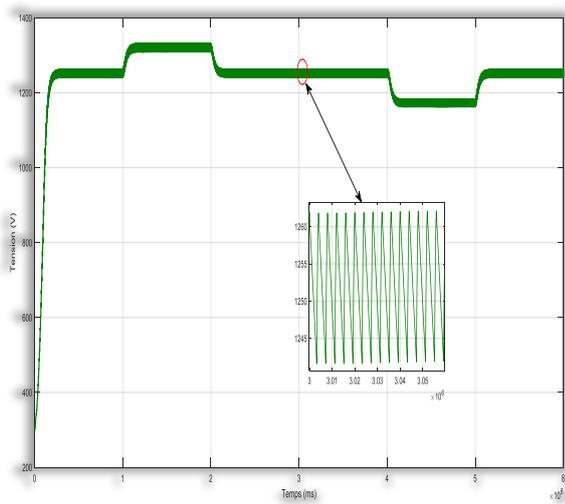


Fig. (II.49) Tension de sortie de l'hacheur.

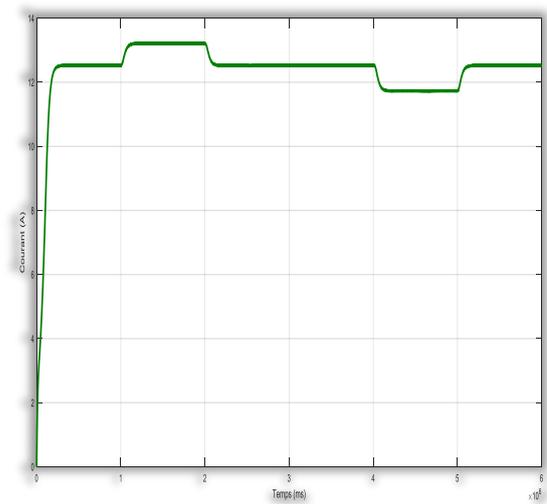


Fig. (II.50) Courant de sortie de l'hacheur.

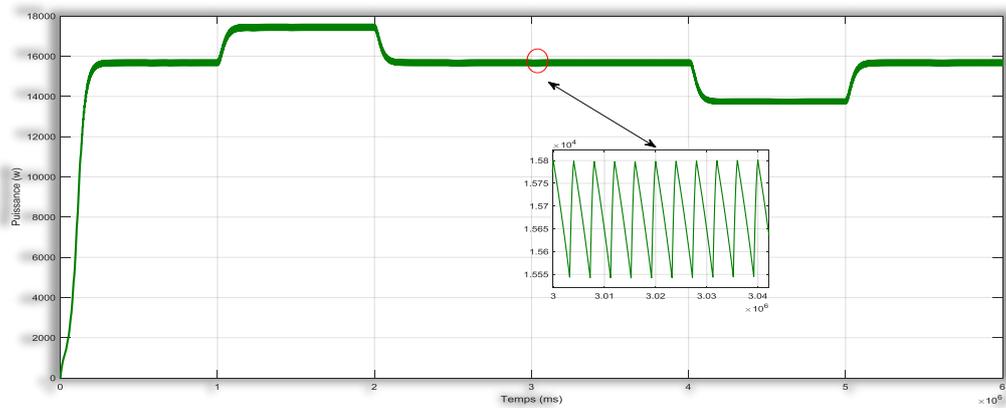


Fig. (II.51) Puissance de sortie de l'hacheur.

b) Irradiation variable

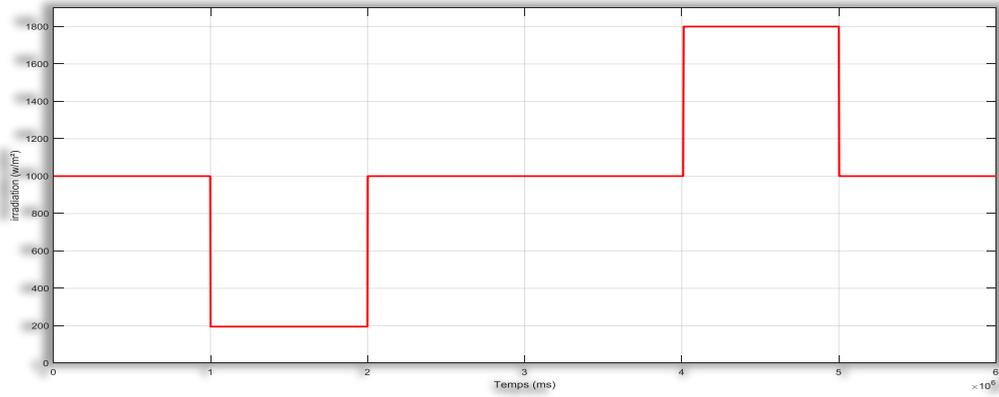


Fig. (II.52) La variation de l'irradiation.

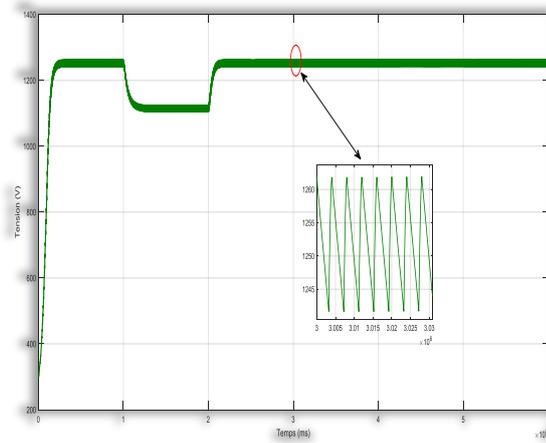


Fig. (II.53) Tension de sortie de l'hacheur.

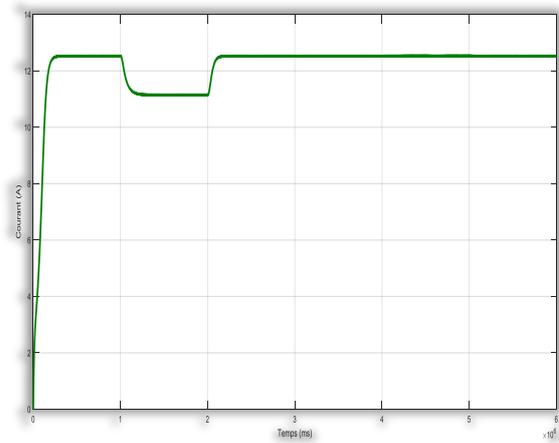


Fig. (II.54) Courant de sortie de l'hacheur.

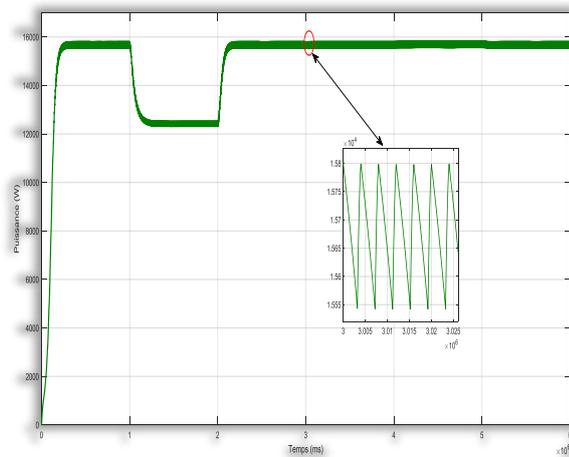


Fig. (II.55) Puissance de sortie de l'hacheur.

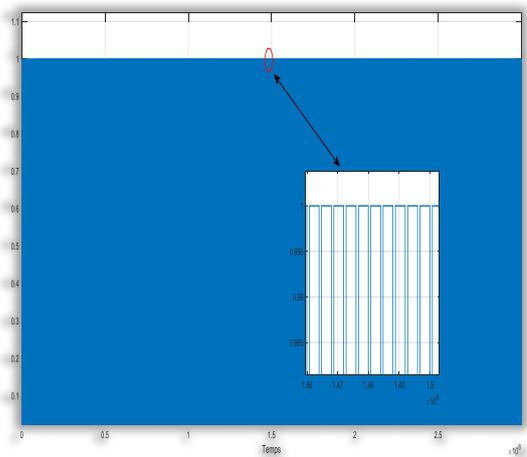


Fig. (II.56) Signal de la gâchette d'IGBT de l'hacheur (MPPT).

D'après les figures (fig.II.49.50.51), à 4ms la température diminue, de 25° à 5° et la puissance augmente autant que toutes les autres variables or que lorsque la température augmente on remarque le contraire.

Les figures (fig.II.53.54.55) montrent que de 0s jusqu'à 0.5s toutes les grandeur P, I et V augmentent jusqu'à la valeur maximale à $t= 0.5s$ l'irradiation diminue de $1000w/m^2$ à $200w/m^2$ la puissance, courant et la tension diminuer par rapport à cette variation. Après 2s on, annule la variation alors les courbes reprennent leurs valeurs maximales.

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les équipements d'électronique de puissance utilisés en adaptation avec les systèmes photovoltaïques. Par ailleurs, leur principe de fonctionnement et leurs modèles mathématiques. Sont mentionnés la problématique liée à la recherche de stratégies de gestion des flux optimaux d'énergie et les caractéristiques fondamentales des éléments de l'installation (puissances crêtes photovoltaïque MPPT) permettant la minimisation des pertes de puissances.

Chapitre III

III.1 Introduction

Devant les contraintes environnementales exigées d'une part et l'augmentation du coût de production de l'électricité d'autre part, la tendance actuelle est orientée vers l'exploitation des sources d'énergies renouvelables. Les installations photovoltaïques peuvent se dispenser d'un système de stockage par batteries et injecter dans le réseau tous les surplus d'énergie produits. Toute injection dans le réseau se traduit par une diminution de la demande sur les centrales hydroélectriques et thermiques, et donc par une « réserve » d'eau ou du gaz qui pourra être mise à profit pendant la nuit, ou lors de périodes de faible lumière.

L'onduleur transfère l'énergie produite des modules (*PV*) dans le réseau en gardant une tension alternative constante. La modélisation et la simulation ont été effectuées sous le logiciel Matlab/Simulink.

Ce chapitre présente un modèle de simulation de l'ensemble des éléments électriques constituant d'un générateur photovoltaïque raccordé au réseau. Le modèle contient une représentation des composants principaux du système, le générateur photovoltaïque, le convertisseur (DC-DC, *boost*), l'onduleur de tension commandé par *MLI* et le réseau électrique.

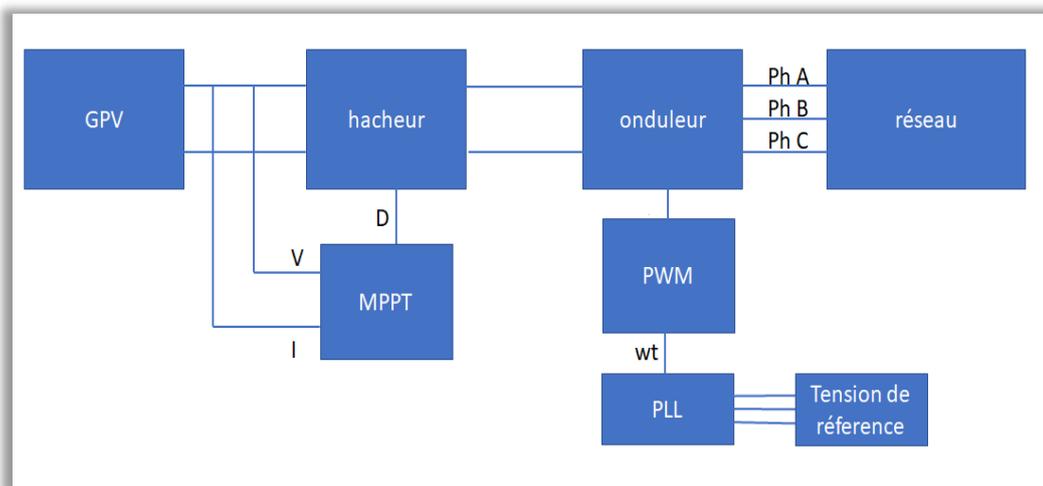


Fig. (III.1) Schéma globale d'un système PV raccordé au réseau

III.2 Onduleurs :

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet la transformation de l'énergie de type continue, en une énergie alternative. la forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale), c'est que le taux d'harmonique soit très faible, et ça dépend essentiellement à la technique de commande utilisée.

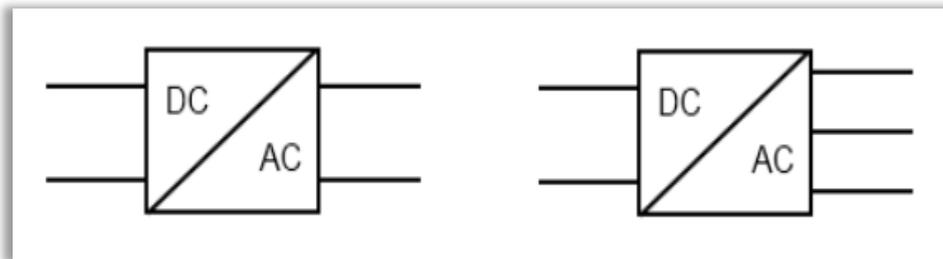


Fig. (III.2) : Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé

III.2.1 Technologies de couplage des onduleurs avec le réseau

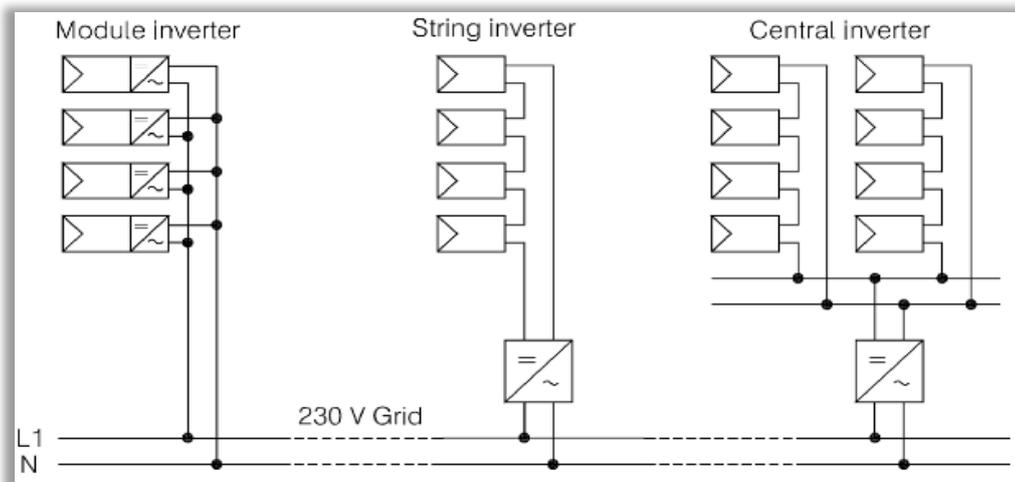


Fig. (III.3). Classification des onduleurs PV connectés au réseau [21]

L'onduleur couplé au réseau est utilisé pour les installations photovoltaïques. Il permet de transformer le courant continu, produit par les modules solaires, en un courant ondulé conforme à celui du réseau. Il adapte également le courant produit à la fréquence et à la tension du réseau. Dans les installations d'habitation, le courant solaire produit est d'abord utilisé par l'habitation elle-même, si le courant produit pour l'habitation est excédentaire, l'excédent est injecté dans le réseau. L'installation d'un onduleur couplé au réseau électrique se fait avec

l'accord de l'organisme de distributeur de d'énergie électrique. Pour des raisons de sécurité, un onduleur couplé au réseau doit constamment surveiller ces perturbations et interrompre immédiatement l'injection en cas de défaillance ou de coupure. Ceci est absolument nécessaire pour permettre une intervention sans danger sur le réseau [21].

III.2.1.1 Onduleurs modulaires (module inverter)

Suivant ce concept, chaque module solaire dispose d'un onduleur individuel (par ex. Soladin 120 de Master volt). Pour les installations plus importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module solaire correspondant [22].

III.2.1.2 Onduleurs centralisés (central inverter)

Un onduleur centralisé de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de cellules solaires en courant alternatif. Le champ de cellules solaires est en règle générale constitué de plusieurs rangées connectées en parallèle. Chaque rangée est elle-même constituée de plusieurs modules solaires connectés en série. Pour éviter les pertes dans les câbles et obtenir un rendement élevé, on connecte le plus possible de modules en série [22].

III.2.1.3 Onduleurs "String" - ou " de Rangée"

L'onduleur String est le plus utilisé. Le plus souvent, huit (ou plus) de modules solaires sont connectés en série. Comme une seule connexion série est nécessaire, les coûts d'installation sont réduits. Il est important de noter qu'en cas d'ombrage partiel des modules solaires, il n'y a pas de perte, l'emploi de diodes de by-pass est fortement recommandé [22]. Les installations jusqu'à 3 Kilowatt de puissance sont fréquemment réalisées avec un onduleur String. Pour une puissance plus élevée, il est possible de connecter plusieurs onduleurs String en parallèle, côté courant alternatif. L'intérêt dans ce concept est d'utiliser un plus grand nombre d'onduleurs du même type. Cela réduit les coûts de production et apporte un intérêt supplémentaire : si un onduleur tombe en panne, seule la production de la rangée concernée est défaillante.

Ils sont toujours conçus en triphasé. La plupart du temps, les systèmes (*PV*) sont installés dans les réseaux de distribution basse tension avec une puissance allant jusqu'à 30 *kVA*. Le type du réseau choisi au raccordement détermine la possibilité du choix des systèmes de surveillance, et la détection des défauts.

III.2.2 Modélisation d'un Onduleur :

III.2.2.1 Structure de l'onduleur

La Figure III.4 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. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension U_{dc} [23], ou à deux condensateurs avec un point milieu (C_{dc1} , C_{dc2}), [4]. Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_r , R_r) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau.

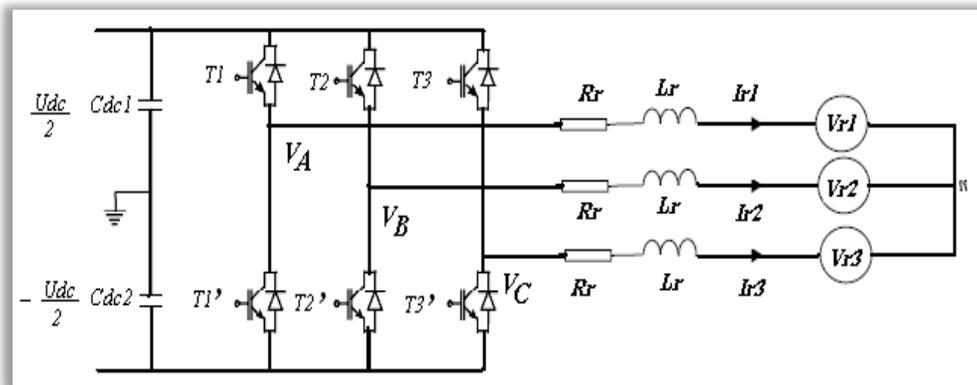


Fig. (III.4) Structure d'un onduleur triphasée

En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'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. Avec l'hypothèse des 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 [24].

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

On aura alors :

$$[V_{abc}] = [T][V_{DC}] \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$$[V_{abc}] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} : \text{Tension alternative équilibrée.}$$

$$[V_{DC}] = \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} : \text{Tension continue.}$$

$$[T] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} : \text{Matrice de transfert de l'onduleur.}$$

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.2.2.2 Commande de l'onduleur

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Deux méthodes de commande peuvent être utilisées [25] :

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

- **Commande par hystérésis**

Le principe de contrôle des courants par hystérésis consiste à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de référence. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation [26].

La simplicité de la mise en œuvre de cette stratégie est son avantage, tandis que la fréquence de commutation variable peut être son inconvénient. Celui-ci peut être remédié par une autre version de contrôle par l'hystérésis avec une fréquence de commutation fixe. Le seul paramètre de régulation dans cette commande est la largeur de la bande d'hystérésis qui détermine l'erreur sur les courants et la fréquence de commutation bien que cette dernière reste inconnue. Le principe de la commande des interrupteurs est illustré par la Fig. (III.5) :

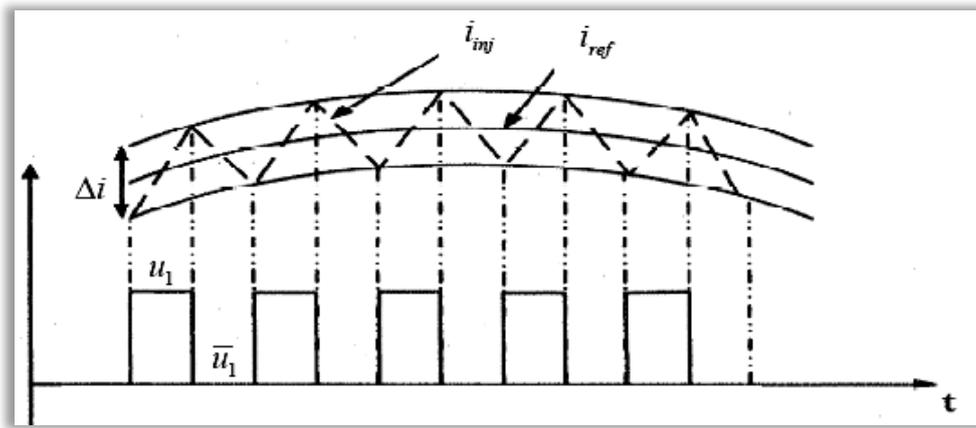


Fig. (III.5) Commande des interrupteurs par hystérésis [26]

- **Commande MLI :**

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 [22].

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 [22].

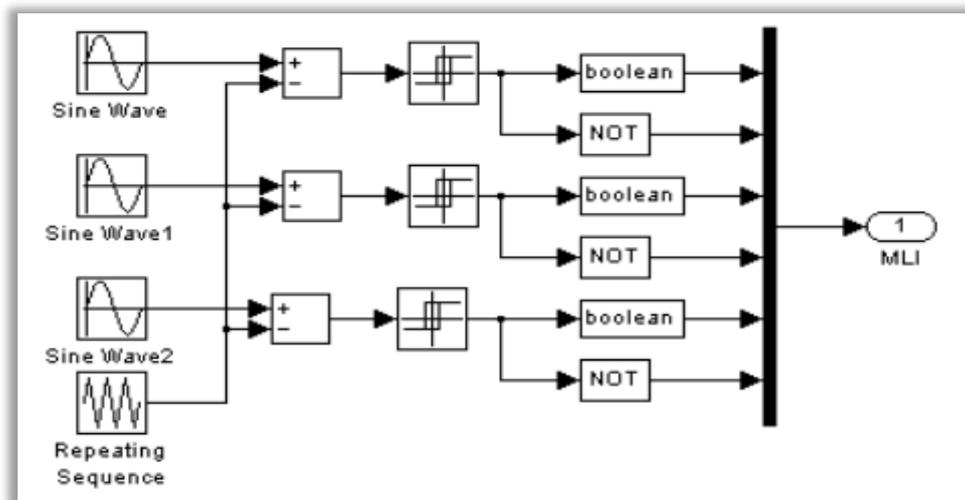


Fig. (III.6) : Schéma de simulation d'une commande MLI

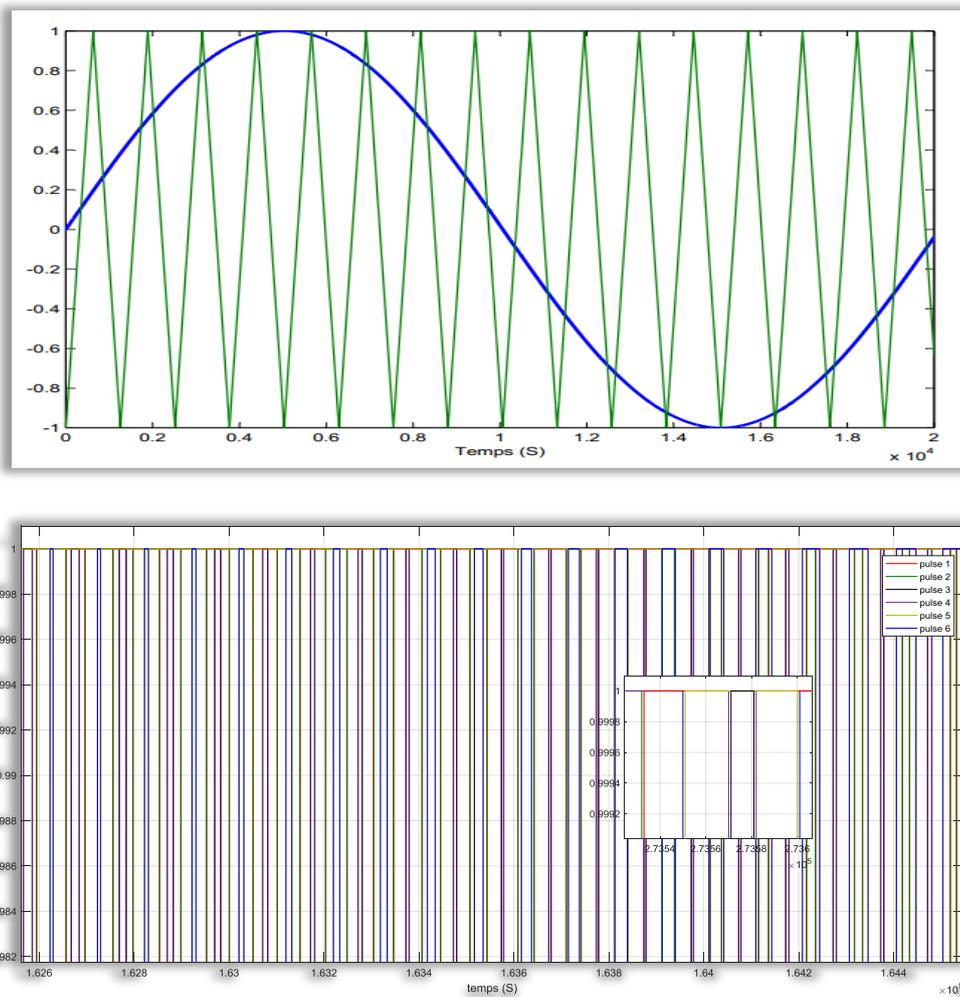


Fig. (III.7) : Signale de la commande MLI et les impulsions des interrupteurs.

III.3 Caractéristiques des onduleurs compatibles avec le réseau

Les critères de compatibilité de l'onduleur avec le réseau sont [28] :

- Temps de réponse
- Facteur de puissance
- Commande de fréquence
- Rendement harmonique
- Synchronisation
- Contribution de courant de défaut
- Injection de courant continu
- Protection

III.4 Réseau électrique :

Le système électrique est structuré en plusieurs niveaux, assurant des fonctions spécifiques propres, et caractérisés par des tensions adaptées à ces fonctions. Il est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution. Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique, ces frontières étant définies par les postes sources et les transformateurs (voir Figure III.8) [29].

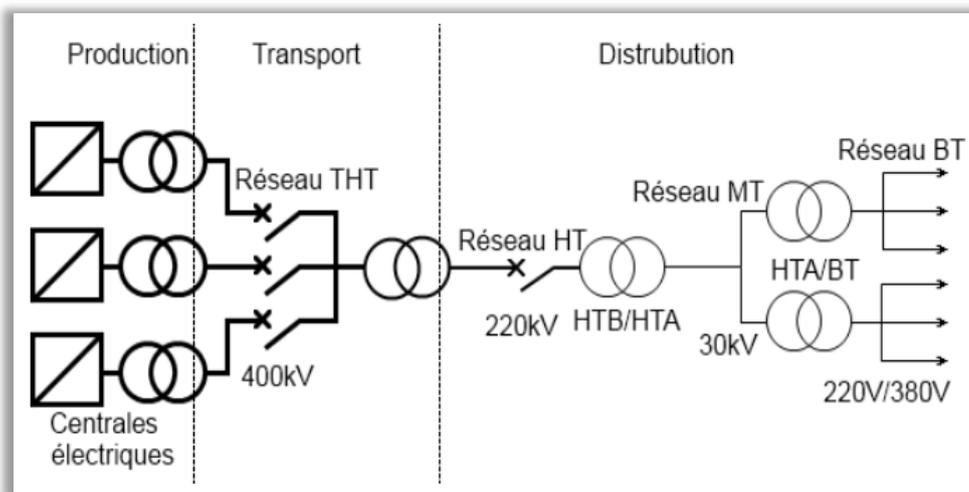


Fig.(III.8) : Schéma générale de production, transport et distribution de l'énergie électrique

III.4.1 Interface de raccordement au réseau électrique

Comme le montre la figure III.9, pour pouvoir connecter l'onduleur de tension en parallèle avec le réseau et le faire travailler comme une source de courant, il est nécessaire d'utiliser un filtre de raccordement de nature inductive (L ou LCL). Finalement, quel que soit le filtre utilisé pour le raccordement, on aura toujours le même schéma équivalent : une source contrôlée (alternative discontinue dans le cas de la topologie L et quasi sinusoïdale avec la topologie LCL) qui se connecte au réseau à travers une inductance. Si on néglige la résistance série de cette inductance et les harmoniques de découpage, le schéma équivalent monophasé du système du point de vue des grandeurs fondamentales sera celui de la figure. III.9 [30] :

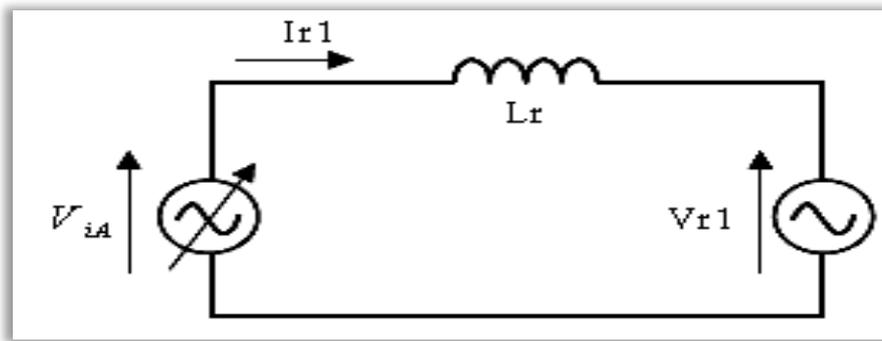


Fig. (III.9) Schéma simplifié de la liaison au réseau.

$$L_r \cdot \frac{dI_r}{dt} = V_{iA} - V_{r1} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

V_{iA} : Tension simple efficace modulée en sortie de l'onduleur [V].

V_{r1} : Tension simple efficace du réseau [V].

L_r : Inductance de sortie de l'onduleur [H].

I_{r1} : Courant transitant vers le réseau [A].

III.4.2 Système triphasé

Le réseau triphasé trois grandeurs sinusoïdales de même fréquence, déphasées entre elles de $2\pi/3$, et ayant même valeur efficace, forment un système triphasé équilibré.

Réseau de distribution électrique. Il est basé sur un système triphasé de tensions. On peut généralement considérer que $(V_a \ V_b \ V_c)$ est un système de tensions triphasé équilibré direct. Il en est de même pour $(U_{ab} \ U_{bc} \ U_{ca})$. On a [31].

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(\omega t) \\ V_b = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c = V_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

$$\begin{cases} U_{ab} = V_a - V_b \\ U_{bc} = V_b - V_c \\ U_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

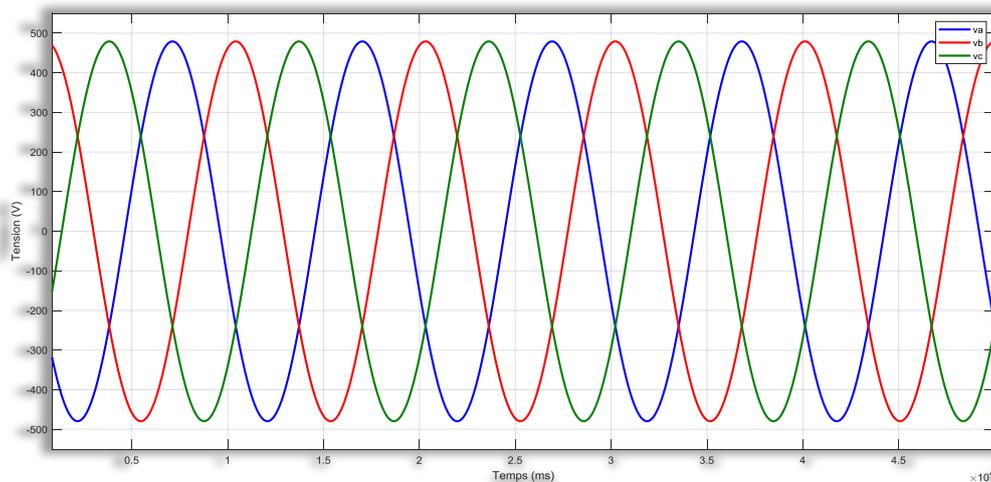


Fig. (III.10) : Système de tensions triphasé équilibré

III.5 Interaction entre le réseau de distribution et les systèmes PV

La filière photovoltaïque, dont le développement est soutenu par les pouvoirs publics (lutte contre le changement climatique, augmentation de la part des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique, soutien de la filière industrielle, ...) possède des caractéristiques spécifiques :

- La puissance de production des installations varie de quelques kW à plusieurs MW.
- Le nombre de producteurs peut devenir à terme très important,
- La plupart des raccordements sont réalisés sur la partie basse-tension du réseau public de distribution
- Les installations comportent des convertisseurs statiques (pas de machines tournantes)
- Les équipements (MPPT, onduleurs et modules) disponibles sur le marché sont variés,
- La production d'énergie est naturellement intermittente,
- Le raccordement des installations est le plus souvent le résultat d'initiatives individuelles et donc n'est pas planifié.

III.5.1 Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution

Dans le passé, les réseaux de distribution se comportaient comme des éléments passifs dans lesquels les flux de puissance s'écoulaient de manière unidirectionnelle du poste source vers les consommateurs finaux. Du fait de l'insertion des productions décentralisées, les flux de puissance et les tensions sont impactés non seulement par les charges mais aussi par les sources. Par suite de ces spécificités techniques des installations photovoltaïques, le raccordement des systèmes PV au réseau peut avoir des impacts importants sur son fonctionnement. Les influences les plus significatives des systèmes PV sur le réseau de distribution sont les suivantes [31] :

III.5.1.1 Influence sur le plan de tension

La présence de générateurs PV a une influence sur le plan de tension et sur les dispositifs de réglage du réseau. La tension varie en fonction des injections de puissances active et réactive sur le réseau. En particulier pendant une période de fort ensoleillement et de faible consommation, la tension de certains nœuds du réseau peut dépasser le seuil admissible [32].

III.5.1.2 Influence sur le plan de protection

La contribution des systèmes PV au courant de défaut dans le réseau de distribution a des conséquences faibles sur le plan de protection. Mais la sélectivité et la sensibilité des protections du réseau peuvent être affectées et provoquer le déclenchement intempestif du départ sain ou l'aveuglement de la protection du départ en défaut.

III.5.1.3 Influence sur la qualité de l'énergie

a) Injection d'harmoniques de courant : la présence d'interfaces électronique de puissance peut injecter des harmoniques de découpage au réseau si les onduleurs ne sont pas munis de filtres efficaces. Les onduleurs actuels contribuent tout de même à l'augmentation des harmoniques de courant car ils fonctionnent le plus souvent à puissance réduite (un appareil fonctionnant à puissance réduite ne peut fournir la même qualité de courant qu'à puissance nominale), ainsi les THD sont plus importants. Les conséquences de ces harmoniques peuvent être instantanées sur certains appareils électroniques : troubles fonctionnels (synchronisation, commutation), disjonctions intempestives, erreurs de mesure sur des compteurs d'énergie [32].

b) Injection de courant continu au réseau

La présence de courants DC dans les réseaux de distribution peut affecter le bon fonctionnement des dispositifs de coupure différentiels, créer des erreurs sur les compteurs d'énergie, affecter la durée de vie des composants du réseau, notamment à travers une augmentation de leur corrosion et enfin contribuer à une saturation des transformateurs [32].

- **Déséquilibre entre phases**

L'insertion des systèmes PV engendre un déséquilibre entre phases en cas d'utilisation d'onduleurs monophasés. Si la puissance produite n'est pas correctement répartie entre les 3 phases d'un même système PV triphasé, alors ce système va contribuer à déséquilibrer le réseau BT [32].

- **Influence sur les pertes dans les réseaux de distribution**

Généralement raccordées sur de départs HTA dédiés, conduiraient à une augmentation des pertes et que les installations PV de type résidentiel, plus proches des lieux de consommation, permettraient de réduire les pertes.

III.5.2 Influence du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques

Les caractéristiques, le fonctionnement et les perturbations des réseaux de distribution peuvent influencer le fonctionnement normal des systèmes PV. Ceci provient généralement, soit des caractéristiques intrinsèques des réseaux de distribution, soit de la qualité de tension dégradée par d'autres utilisateurs du réseau, soit d'une association de ces deux causes. [32]

Ces effets entraînent généralement des découplages injustifiés des onduleurs. Les influences du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques peuvent se résumer comme suit :

III.5.2.1 Régime de neutre et courants de fuite

Le régime de neutre utilisé en basse tension est de type TT. Avec ce régime de neutre, la protection des personnes s'effectue à l'aide de disjoncteurs ou d'interrupteurs différentiels qui ont pour fonction de s'ouvrir en cas de fuite de courant.

Les installations PV peuvent produire des courants de fuite du fait des caractéristiques capacitatives des panneaux, et des onduleurs .

Ces capacités en présence d'une composante alternative sur le circuit à courant continu engendrent des courants de fuite dans la liaison de mise à la terre. Ces courants de fuite peuvent

être d'amplitude importante et devenir potentiellement dangereux pour les personnes en cas de contact direct avec le fil de terre.

III.5.2.2 Niveau de tension du réseau

Le niveau initial (hors PV) de tension du réseau est un paramètre clé vis-à-vis du dimensionnement et du fonctionnement des installations PV et les types de protection de découplage.

III.5.2.3 Présence de composante continue et d'harmoniques de tension

Les onduleurs pour systèmes photovoltaïques hachent le courant continu issu des modules photovoltaïques en modulation à largeur d'impulsion (MLI ou PWM pour "Pulse Width Modulation") pour le convertir en courant alternatif sinusoïdal. Le fonctionnement des onduleurs sans transformateur peut être affecté par une asymétrie des tensions du réseau (déformation de la sinusoïde par addition d'harmoniques paires), par exemple en présence d'harmoniques issues de charges non-linéaires, qui se traduirait par l'ajout d'une composante DC dans la tension injectée par l'onduleur.

III.6 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques connectent au réseau

III.6.1 Avantages

- N'ont pas besoin de stockage d'énergie et éliminent donc le maillon le plus problématique (et plus cher) d'une installation autonome. C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie.
- Pas de gaspillage - tout excédent est livré au réseau - particulièrement intéressant pendant les périodes d'absence de son domicile, pendant le week-end, pendant les vacances quand les modules continuent à travailler. On évite les pertes d'énergie associées au stockage en batterie lorsque la batterie est complètement chargée par exemple.
- On n'est pas obligé de calculer méticuleusement ses besoins en électricité, et de prévoir des niveaux de demande exceptionnellement très élevés, même si très rares.
- On peut commencer petit et agrandir par la suite sans problèmes de dimensionnement compliqués.
- On peut satisfaire à une partie ou à la totalité de ses besoins.

III.6.2 Inconvénients

C'est vraiment la voie royale qui permettra au photovoltaïque de faire sa percée dans nos vies. Cependant...

- La consommation risque de redevenir relativement "invisible," et on pourrait retomber dans le piège de la consommation irréfléchie.
- Les contraintes électriques imposées par les sociétés d'électricité peuvent être rigoureuses, et les onduleurs synchrones doivent répondre aux exigences techniques des compagnies de production et de transport d'énergie.

III.7 Problème de synchronisation (onduleur-réseau)

L'étude de la synchronisation de la commande par rapport à l'évolution des tensions du réseau est à base de la PLL triphasée, qui consiste à appliquer une transformation inverse de Park sur les tensions triphasées du réseau. La composante d'axe générée par cette transformation est asservie à zéro par action sur l'angle du repère de Park (θ_{est}). En régime établi l'angle (ωt) est égal à l'angle du réseau.

- Le schéma simplifié de régulation et de simulation de la PLL dans le domaine de Park est donné par la Figure (III.11) :

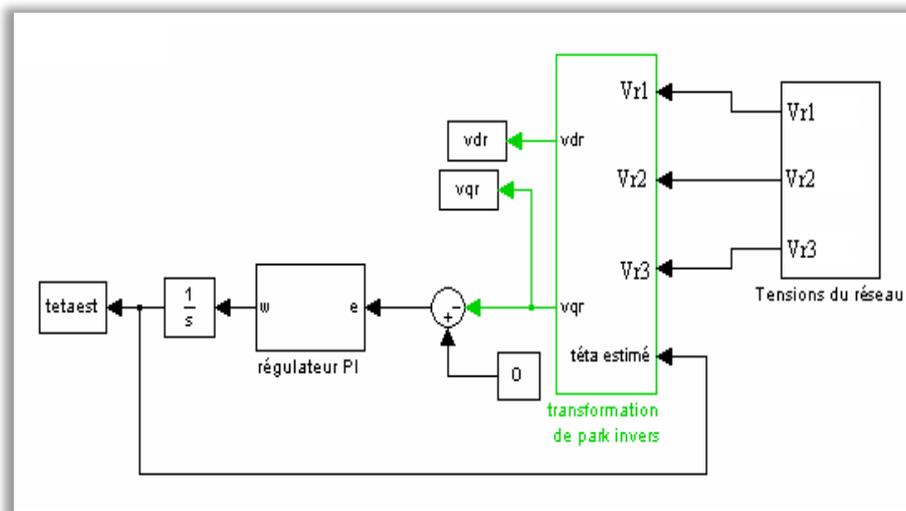
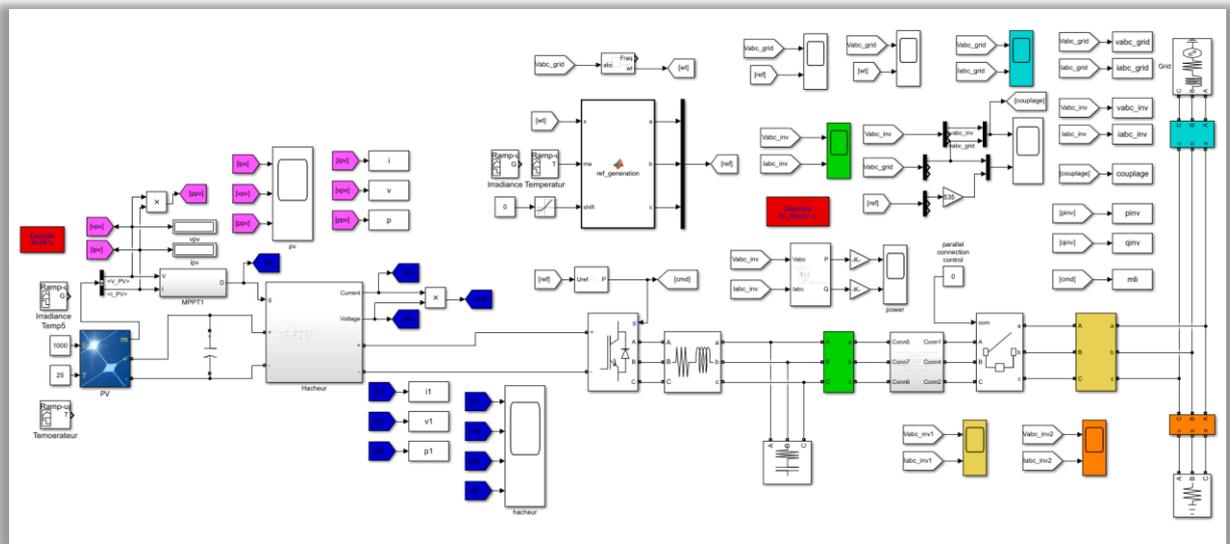


Fig. (III.11). Schéma block de simulation

III.8 Simulation global de PV raccordé au réseau :

III.8.1 Schéma de simulation :



*Fig. (III.12) Schéma global de simulation d'un panneau photovoltaïque
raccordée aux réseaux électriques.*

III.8.2 Résultats de simulation :

a) Tension et courant du réseau

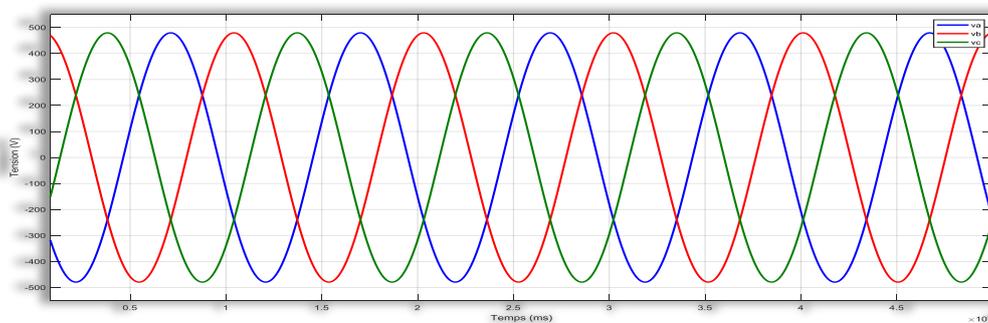


Fig. (III.13) Tensions de réseau V_{abc} .

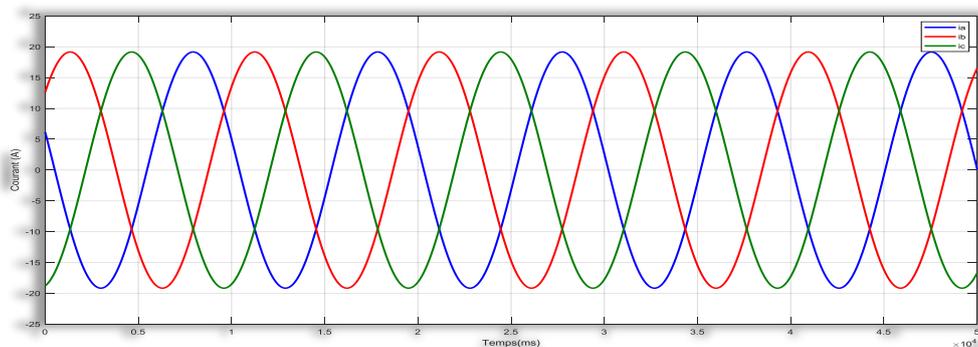


Fig. (III.14) Courants du réseau I_{abc} .

b) Effet de la variation de l'irradiation

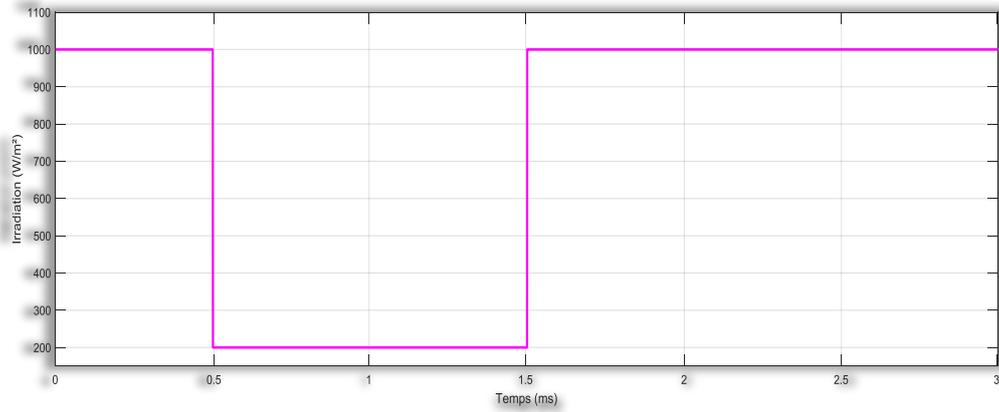


Fig. (III.15) Variation de l'irradiation G utilisé.

• **Coté onduleur**

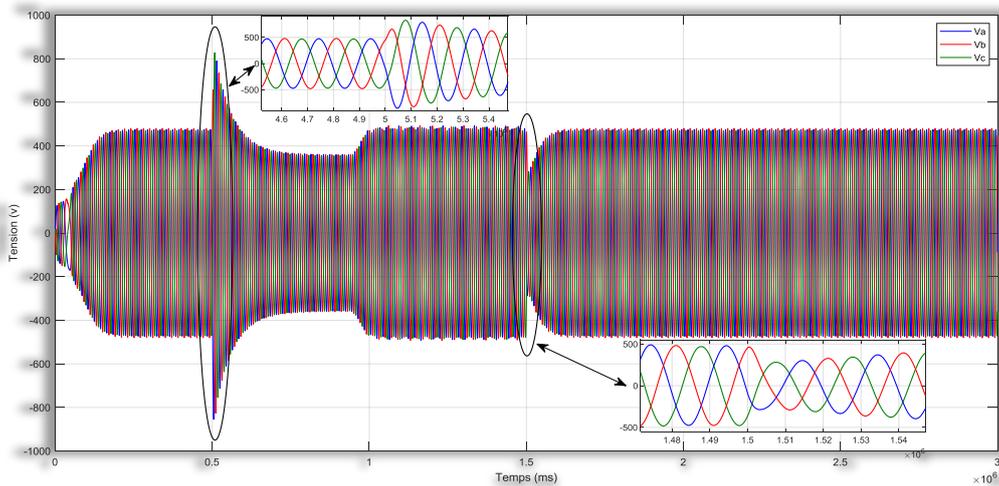


Fig. (III.16) Tension de sortie de l'onduleur V_{abc} .

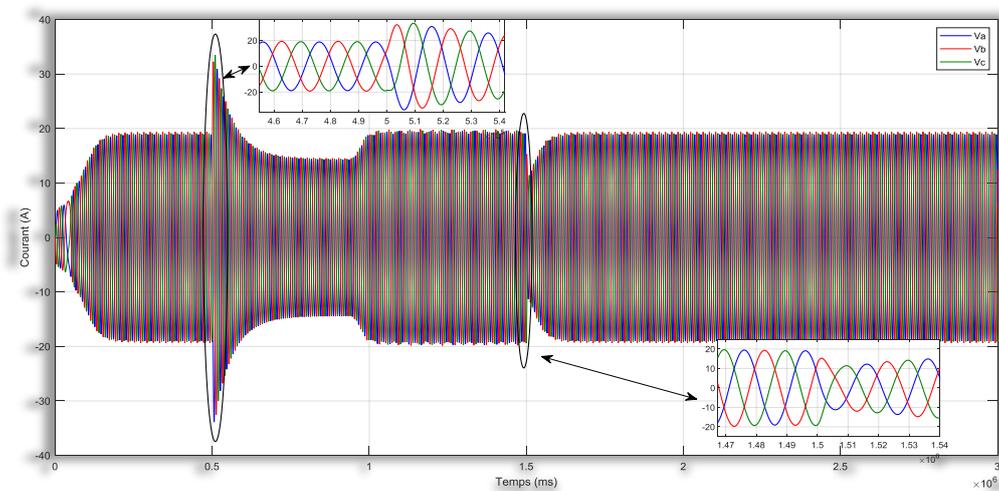


Fig. (III.17) Courant de sortie de l'onduleur I_{abc} .

- Côté charge (couplage réseau – onduleur)

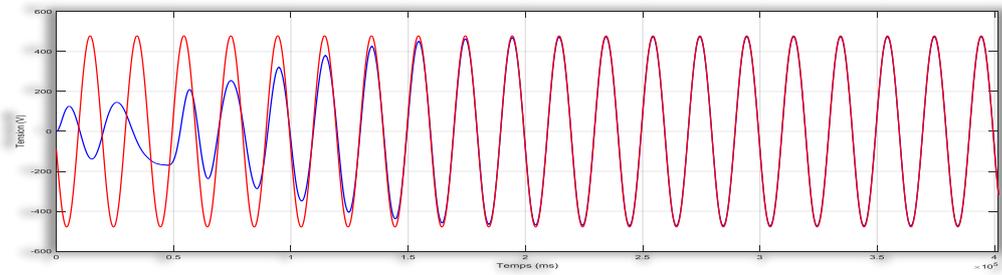
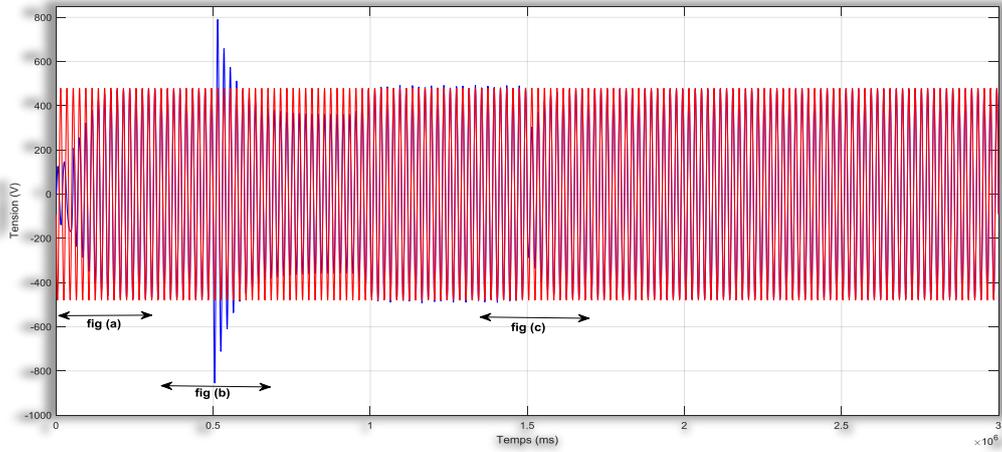


Fig.(a)

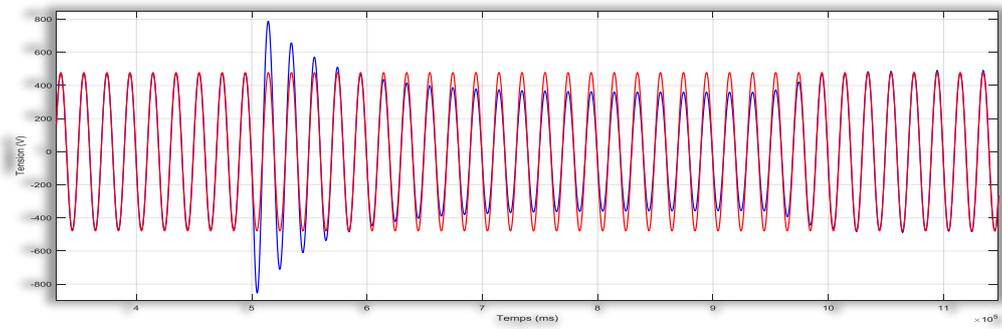


Fig.(b)

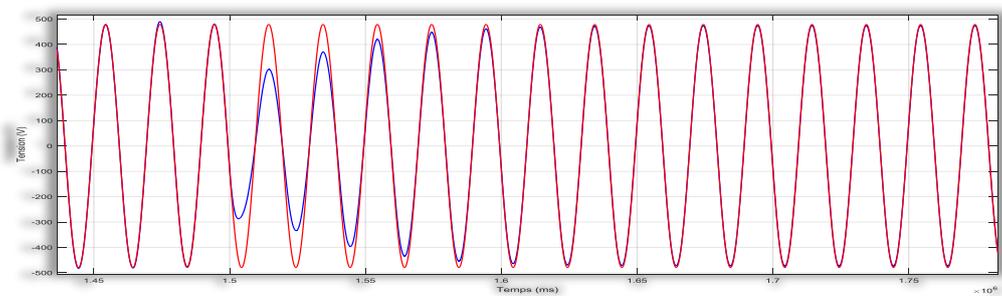


Fig.(c)

Fig. (III.18) Couplage de tension de sortie de l'onduleur avec le réseau.

c) Effet de la variation de température

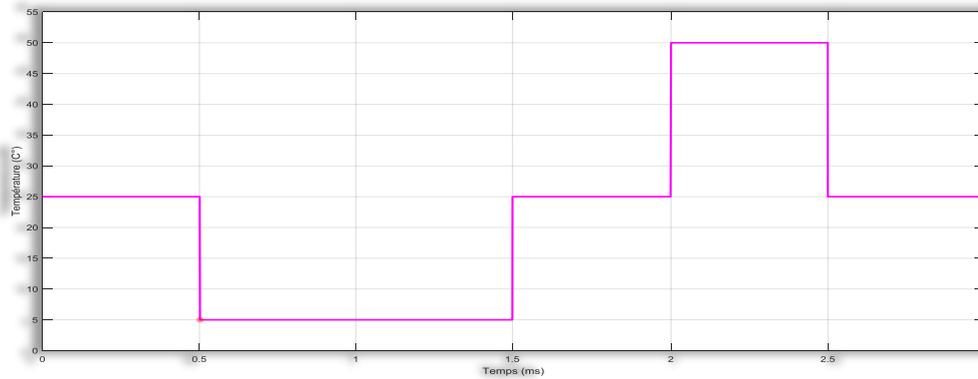


Fig. (III.19) Variation de la température utilisée.

- Cote onduleur

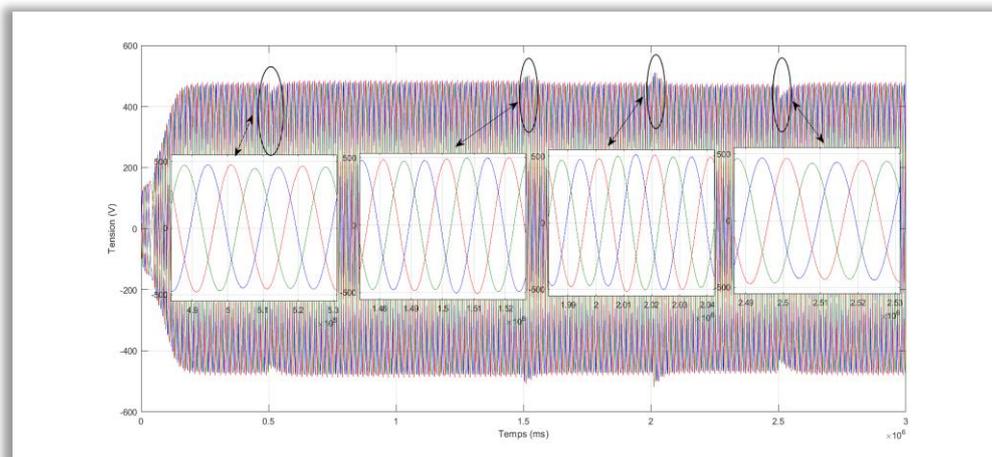


Fig. (III.20) Tension de sorti de l'onduleur V_{abc} .

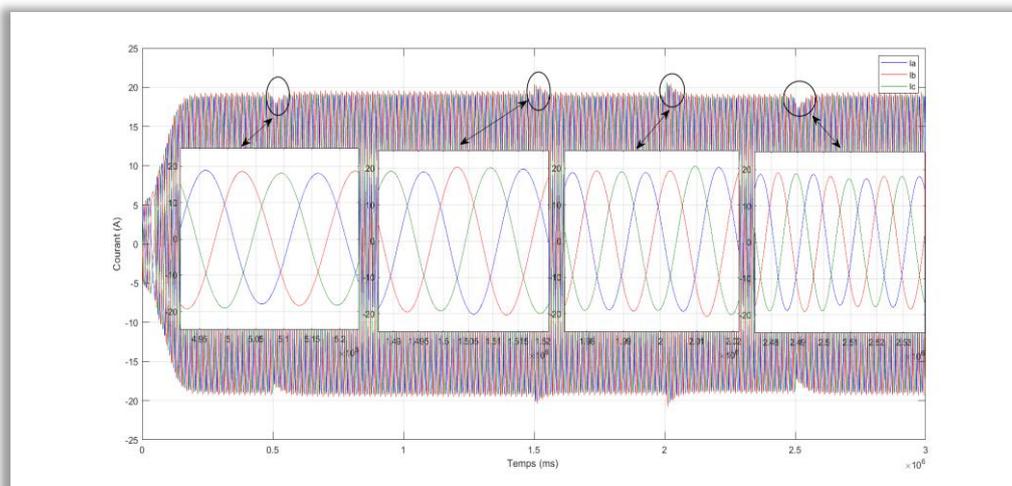


Fig. (III.21) Courant de sorti de l'onduleur I_{abc} .

- Coté charge

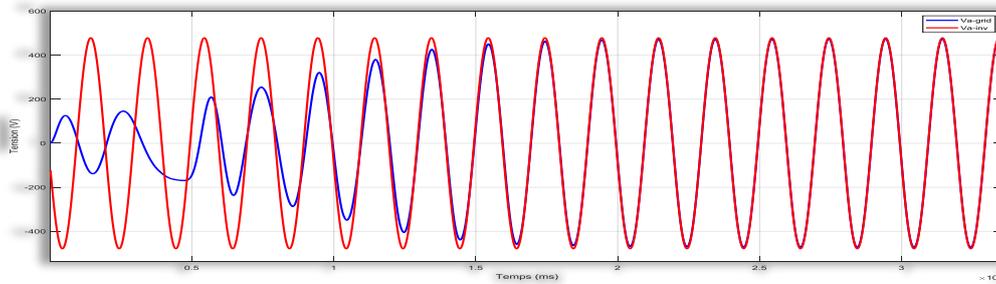
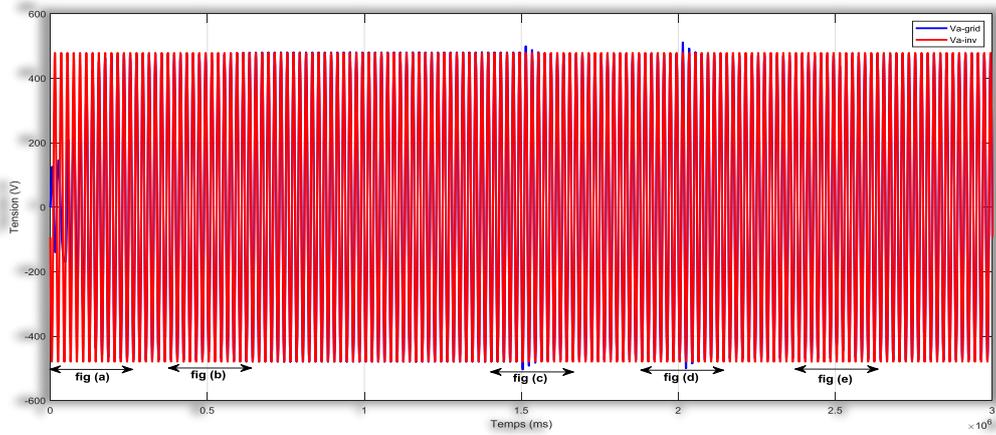


Fig.(a)

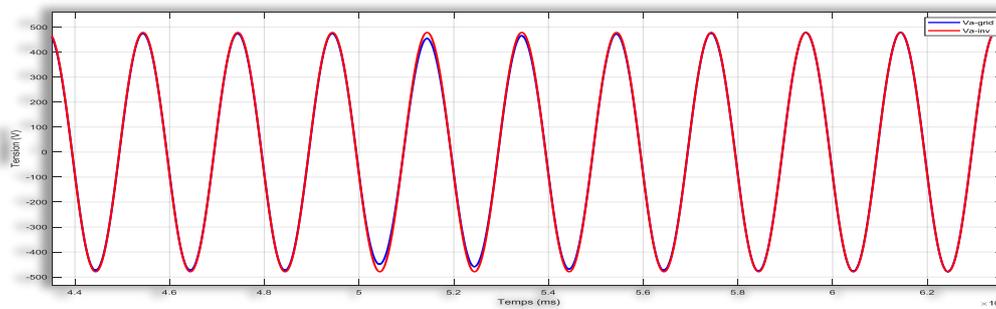


Fig.(b)

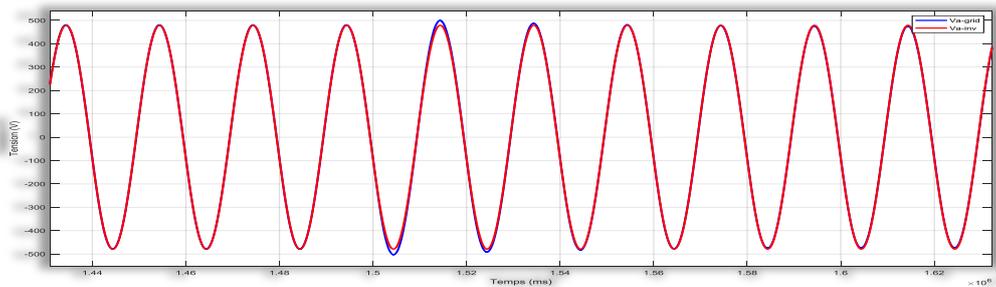


Fig.(c)

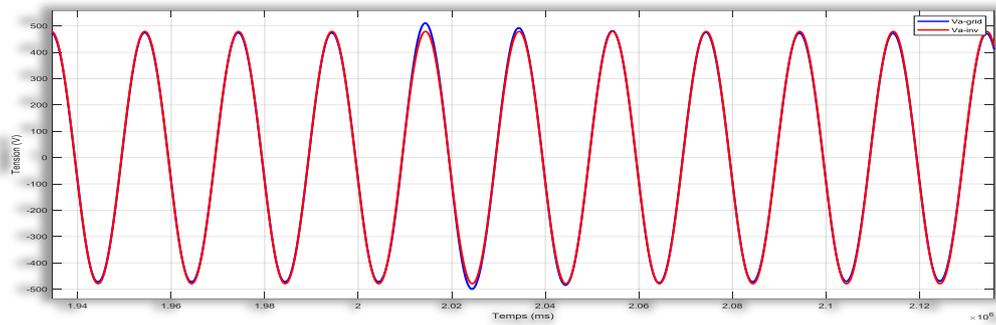


Fig.(d)

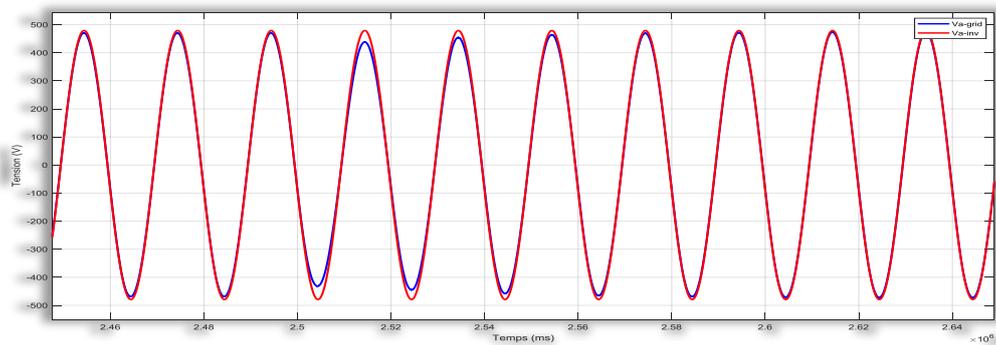


Fig.(e)

Fig. (III.22) Couplage de tension de sortie de l'onduleur avec le réseau.

Notre but dans cette étude est la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique.

Les résultats obtenus par simulations sont validés d'une manière générale par rapport aux références bibliographiques.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé et simulé tous les équipements représentant le système photovoltaïque connectés au réseau électrique, tel que, le générateur photovoltaïque, le hacheur survolteur, l'onduleur et le réseau. 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.

La validation des résultats est obtenue par les réponses des tensions, des courants et des puissances qui sont celles obtenus par simulation se rapprochent à celles présentées dans la littérature ce qui nous permet de valider notre travail.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire de fin d'étude concerne les systèmes photovoltaïques couplés au réseau électrique. Ce dispositif est amené à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production et d'un meilleur respect de l'environnement. Associées à une production centralisée, ces petites ou moyennes unités peuvent permettre une mutualisation avantageuse de ressources très réparties, très fluctuantes, et contribuer à une meilleure gestion de l'énergie électrique dans un contexte de développement durable.

Ainsi, après un bref rappel sur les ressources énergétiques renouvelables et sur les systèmes de production associés, nous nous sommes intéressés aux chaînes de production photovoltaïque.

Les études énergétiques, menées aussi bien sur les plans théoriques, ont permis de montrer : Concernant le générateur photovoltaïque, qu'un modèle mathématique (courant - tension) du circuit électrique équivalent, en tenant compte de la température, permet une estimation précise et rapide de la production d'énergie pour des conditions météorologiques données (ensoleillement et température). La conversion d'énergie PV, consistant à décrire le concept de modularité de la chaîne de conversion, au développement de nouvelles architectures à très haut rendement de conversion. Cette maximisation de la production, compte tenu du caractère fluctuant de la source PV considérée, passait par le développement de commandes de types MPPT performantes, à hauts rendements, en particulier lors des divers transitoires (*changements brusques d'ensoleillement*). Pour notre part, nous avons opté pour une commande P&O (perturbation et Observation).

Les études sur le couplage entre le photovoltaïque et d'autres sources d'énergies ont débuté en 2000 et ont porté sur la conception et la réalisation de générateurs d'énergie connectés aux réseaux. L'accent a été toujours mis sur le caractère modulaire des diverses architectures de conversion proposées. Même si la cible visée en premier lieu concernait les réseaux électriques autonomes, le caractère approché permet aujourd'hui de projeter les résultats obtenus vers des systèmes connectés à des réseaux centralisés.

Notre travail de l'étude de la connexion au réseau électrique se résume comme suit : Un convertisseur *DC/DC* qui fournit une tension continue réglable et un convertisseur *DC/AC* commandé par la MLI (sinus triangle) à transistors IGBT qui convertit celle-ci à une tension alternative filtrée par des filtres a été modélisé et simulés sous Matlab-Simulink.

L'intérêt porté aux énergies renouvelables, nous a amené à nous intéresser aux systèmes photovoltaïques comme production décentralisée. Ces systèmes utilisent des convertisseurs pour se connecter au réseau électrique et la puissance injectée est fortement variable puisqu'elle

Conclusion générale

est dépendante de l'éclairement et la température. Une étude bibliographique a permis de recenser les différents systèmes photovoltaïques pouvant être connectés au réseau. Deux classes en sont ressorties : les connections directes au réseau et les connections à bus intermédiaire, ce dernier et celui choisi dans notre travail. La connexion au réseau électrique est un élément particulièrement important pour ce type de générateur.

L'étude de la synchronisation des courants de références a permis de mettre en évidence l'importance du choix du système qui réalise cette fonction. Habituellement, la synchronisation est faite par l'intermédiaire de PLL dans le domaine de Park.

Le système de synchronisation (PLL) a pour but de reconstituer une information sur la composante directe de la tension fondamentale du réseau, assurant la commande par rapport à l'évolution des tensions du réseau en cas de diverses perturbations qui peuvent survenir sur le réseau électrique (creux de tension, saut de phase, harmoniques, déséquilibre). L'identification et régulation des courants de références est indispensable afin d'injecter le maximum de la puissance produite.

De cette étude ressort l'importance de la modélisation de la connexion au réseau électrique et de son ou ces systèmes de production. La commande de l'onduleur et les systèmes de productions déterminent le comportement principal de la production décentralisée sur le réseau basse tension. Les technologies actuelles permettent une souplesse de commande importante et même de s'adapter aux défauts du réseau et ainsi de ne pas être déconnectée du réseau. Pour les systèmes photovoltaïques, la souplesse de l'utilisation des convertisseurs statiques est sous employée. En perspectif, il serait intéressant d'étudier les limites possible d'employabilité d'une déconnexion du réseau.

References

- [1] EurObserv'ER, "Twelfth Inventory of Worldwide Electricity Production from Renewable Energy Sources", 2010.
- [2] M. Benhaddadi, G. Olivier, "Dilemmes Energétiques", Presses de l'Université du Québec PUQ, 2008.
- [3] Ministère de l'Énergie et des Mines, "Guide des Énergies Renouvelables", <http://www.memalgeria>.
- [4] 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.
- [5] A. Sahli, « Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes Photovoltaïques interconnectés au réseau », Mémoire de Magistère, Université de Sétif 2012.
- [6] W. Boucheritte, « Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au Réseau », Mémoire de Magistère, Université de Biskra.
- [7] M. Makhoulf, « Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie Photovoltaïque application au pompage », Mémoire de magister, université de Constantine 2006.
- [8] A. JACQUOT « Ingénierie des Matériaux et des Microgénérateurs Thermoélectriques Planaires » Thèse de doctorat, l'Institut national Polytechnique de Lorraine Mars 2003.
- [9] M. Gerl, J.-P. Issi, « Physique des Matériaux », Chapitre 8, Presses Polytechniques et Universitaire Romandes, Lausanne, 1997.
- [10] A. Linder, « La thermoélectricité », Chapitre 3, Presses Universitaires de France, Paris, 1970.
- [11] L. Protin, « Convertisseurs photovoltaïques », Technique de l'ingénieur, traité génie Électrique 2001.
- [12] Akihiro Oi, « Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System » Faculty Of California Polytechnic State University, 2005.
- [13] H. Knopf, « Analysis, Simulation and Evaluation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Methods for a Solar Powered Vehicle » Portland State University, 1999.
- [14] T. ESRAM, Student Member, IEEE, and Patrick L. Chapman, Senior Member, IEEE, « "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques » IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006.
- [15] « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque » M.Hatti, IEEE Member, , JCGE.08 LYON, 16 et 17 décembre 2008.
- [16] M. A. S. Masoum and M. Sarvi, « Design, Simulation and Implementation of a Fuzzy-Based MPP Tracker Under Variable Insolation and Temperature Conditions », Iranian Journal

References

of Science & Technology, Transaction B, Engineering, Vol. 29, No. B1, 2005.

[17] H. Boumaaraf1, A.Talha, «"Modeling of a Photovoltaic Panel and the Search for its Maximum Power Point Tracking", EFEEA ».10 International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications, 2010.

[18] W.Xiao, «"Improved Control of Photovoltaic Interfaces » The University of British Columbia,2007.

[19] T. Edward Persen, «FPGA-Based Design of a Maximum-Power-Point-Tracking System for Space Applications» University of Florida, 2004.

[20] M.Angel Cid Pastor, «Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques» Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.

[21]. A. Oi, « Design and simulation of photovoltaic water pumping system ». Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Electrical Engineering, Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo September 2005.

[22]. [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

[23]. 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.

[24]. 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.

[25]. E. Gholipour Shahraki, « 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.

[26]. J. XU « Filtrage active shunt des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité ». Thèse de doctorat de l'INPL, Nancy, Janvier 1994.

[27]. M. Boudjdaimi « Commande d'un onduleur par des approches basées sur des réseaux de neurones artificiels ». Mémoire de magister, UMMTO, 27/09/2009.

[28]. J. David Irwin, MUHAMMAD H. RASHID « Power electronics Handbook ». University of West Florida Joint Program and Computer Engineering, Copyright # 2001 by ACADEMIC PRESS.

[29]. Thi Minh Chau LE, " Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects contrôle/commande et rejet de perturbations", thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 25/01/2012

[30]. I. Etxeberria-Otadui, « Les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique : application à la qualité de l'énergie ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, septembre 2003.

References

[31] Guy Chateigner, Michel Boës, "Manuel de génie électrique", Dunod, 2007

[32] T. Minh Chau Le, « Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects Contrôle/commande et rejet de perturbations » Thèse de Doctorat, Université de Grenoble France 2012.

Symbole

PV: Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque

MPPT: Maximum Power Point Tracking

E_c : Énergie de conduction.

E_v : Énergie de valence

λ : La longueur d'onde

h : La constante de Planck

c : La vitesse de la lumière

V: Tension de sortie de la cellule

R_S : Résistance série

R_P : Résistance parallèle

I : Courant de sortie de la cellule

I_{ph} : Courant photo-généré ou photo-courant (A)

I_0 : Courant de saturation de la diode (A)

T_c : Température absolue de fonctionnement de la jonction (K°)

m: Facteur d'idéalité de la diode ($m \in [1, 2]$), La valeur typique de m est 1.3

q: La charge électrique $1.6 \cdot 10^{-19}$ (c)

k: Constant de Boltzmann $1.38 \cdot 10^{-23}$ j/k

E_m : Eclairement moyenne (w/m²)

T_{uc} : Température d'utilisation de la cellule (c)

V_{cos} : Tension à vide résultante d'un groupe de cellule série.

V_{co} : Tension à vide d'une cellule.

I_{ccp} : courant de court-circuit résultant d'un groupe de cellule parallèle

I_{cc} : courant de court-circuit d'une cellule

FF : Facteur de forme.

Symbole

Ns : Nombre des cellules en série.

Np : Nombre des cellules en parallèle.

Rp : Résistance parallèle shunt(Ω).

Rs : Résistance série(Ω).

DC : Courant Continu (Direct Current).

E : Tension d'entrée (V)

V ch : Tension de sortie (V)

α : Rapport cyclique

L: L'inductance (H)

K: intrèpeteur commandé

D: diode (intrèpeteur non commandé)

C : Capacité d'un convertisseur (F)

I ch : Courant de charge (A)

P&O : Perturbé&Observé

INC : Incrément de conductance

CS : convertisseurs statiques

GS : Générateur Solaire.

DC: Courant Continu (Direct Current).

AC: Courant Alternatif (Alternative Current).

Programme utiliser dans la simulation de la cellule

```
%parametre du panneau
k=1.38e-23;
q=1.6e-19;
t=273;
icc =3.99;
vco=22.1;
vpm=17.6;
ipm=3.69;
ncell=36;
tcell=25;
vt=(k*(t+tcell))/q;
is=icc/exp(vco/(ncell*vt));
%is1=icc/exp(vco/(ncell*2*vt));
rs=ncell*vt*log((icc-ipm)/is)/ipm-(vpm/ipm);
%rs1=ncell*vt*log((icc-ipm)/is1)/ipm-(vpm/ipm);
```

Programme utilisé dans la simulation de la commande d'onduleur

```
function [a,b,c] = ref_generation(x,ma,shift)

%x=wt

shift_k=shift*pi/180;%degree to rad/s
a=(ma*(sin((x)+shift_k)));%phase A reference voltage
equation
b=(ma*(sin((x)+shift_k-(2*pi/3))));
c=(ma*(sin((x)+shift_k+(2*pi/3))));
```

Programme utilisé dans la simulation de réseau

```
f=50;%system frequency
Vbase=380;%Grid voltage
fs=99*f;%switching frequency
Ts_Power=1/(fs*100);%sampling time
p=50e3;%inverter power
%filter inductance parameters
pbase=Vbase^2/p;
RL=1.5e-3*pbase;
L=2.12*pbase/(2*pi*f);
%filter capacitor parameters
Qc=0.1*p;
Pc=Qc/50;
```