



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA
Faculté De Technologie
Département de Génie Électrique
Spécialité : Électrotechnique

En vue de l'obtention du diplôme master en électrotechnique
Options : Energies renouvelables en électrotechnique.
Réseaux électriques.

Thème

**Connexion d'un système photovoltaïque
au réseau électrique par le biais d'un
onduleur multi-niveaux.**

Réalisé par :

❖ M^{elle} YAKOUBI Líticia

❖ M^{elle} ZIDANI Kamelia

Encadré par :

Mr. B. AMROUCHE

Mlle. S. NACEF

Promotion 2022/2023

DEDICACES

Je dédie ce projet de fin d'étude :

*À mon très cher père **Mustapha YAKOUBI***

Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es.

Grâce à toi papa j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité... Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi.

*À ma chère mère **Nedjima YAKOUBI***

Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi. Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, tu as toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait et je t'en remercie.

*À mes grands-parents maternels **Rabah et Louiza.***

*À la mémoire de mes grands-parents paternels **Salah et Zoulikha.***

*À mon cher frère **Wanis**, à mes chères sœurs **Souad, Imene** et À ma belle-sœur **Lamia.**
Vous qui m'avez toujours soutenu, réconforté et encouragé je vous remercie du plus profond de mon cœur.*

*À mes trois nièces **Adeena, Amalya et Ayeline**, À mes deux neveux **Kenzy et Isaac.***

À TOUTE MA FAMILLE.

*À ma chère binôme **Kamelia.***

À tous mes ami(e)s, la liste est longue mais je ne pourrais hélas citer que quelques-uns :

Badis, Cessi, Dida, Namira, Amina, Yasmine

En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

TICIA

Dédicaces

*Du plus profond de mon cœur et avec tout le respect que je leurs dois,
je dédie avec joie, plaisir, amour et gratitude ce modeste travail :*

*A ceux qui ont beaucoup sacrifié de leur temps pour mon bonheur et ma réussite :
Ma source éternelle d'inspiration, de motivation et de bénédiction...Ma mère*

Haddad Hassina

Mon maître de passion, de patience et de persévérance...Mon père Z.Boualem

*A mon très cher frère dont une grande part du mérite lui revient et dont un
simple merci est beaucoup trop peu pour lui*

A mes sœurs que j'aime tant : Chahrazed, Nawel, Mélissa et Leticia

A mes petits neveux et nièces : Daniel, Asma, Aris, Aymen et

Kylian

*A ma meilleure amie ou ferais-je mieux de dire mon âme sœur Méliz, qui a su
me supporter et m'encourager au cours de ces neuf dernières années*

*A tous mes amis dont la liste est longue mais que je ne pourrais hélas citer que
quelques-uns :*

*Nadjet,Shanez,Amdjed,Dylan,Massi,Lily,Loulou,Rym,Ahlem,Amina,Yasmine,
Kahina, Alice, Diana*

Et à ma chère binôme Ticia

*A toutes les personnes pour lesquelles j'ai une place dans leurs cœurs,
qu'elles trouvent dans cet humble hommage l'expression de ma profonde
gratitude.*

Zidani Kamelia

*« Il faut toujours viser la lune, car même en cas d'échec, on atterrit dans les
étoiles ».*

Oscar Wilde

REMERCIEMENTS

*Au terme de ce travail, on remercie en premier lieu, le bon
DIEU le créateur
qui nous a facilité le chemin, et donné la persévérance pour
réaliser ce modeste
travail.*

*On remercie notre encadrant **Mr. B. AMROUCHE**, ainsi
que notre co-encadrante **Mlle. S. NACEF** pour leurs
aides, leurs conseils
et leurs patiences.*

*À toute personne ayant contribué de près ou de loin à
l'accomplissement de ce
travail, trouve ici l'expression de nos sincères
remerciements.*

Sommaire

Dédicaces	
Remerciements	
Sommaire	
Liste des figures.....	i
Liste des tableaux.....	ii
Liste des abréviations et symboles.....	iii
Introduction générale.....	1
Références bibliographiques.....	

Chapitre I : Systèmes de production photovoltaïque

I.Introduction générale	1
I.1.Introduction.....	3
I.2.L'énergie renouvelable.....	3
I.2.1. Différentes sortes d'énergies renouvelables.....	3
I.3. L'énergie solaire photovoltaïque.....	3
I.3.1. Principe de la conversion photovoltaïque	3
I.4. Différentes technologies des cellules solaires.....	4
I.5.1. Caractéristique courant tension ($I_{pv}-V_{pv}$).....	5
I.5.2. Caractéristique puissance tension ($P_{pv} - V_{pv}$).....	5
I.5.3. Zones de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	6
I.5.4. Influence de la température et de l'éclairement sur une cellule photovoltaïque	7
I.5.4.1. Influence de la température.....	7
I.5.4.2Influence de l'éclairement.....	8
I.5.4.3. Influence du changement d'éclairement et de la température.....	8
I.6. Association des cellules photovoltaïques.....	9
I.6.1. Association série	10
I.6.2. Association parallèle	10
I.7.Module photovoltaïque	10
I.8.Protection des modules photovoltaïques.....	11
I.9.Configuration des systèmes photovoltaïques	11
I.9.1. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau	11
I.9.1.1 Exemples de structures des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau	12
I.9.2 Systèmes photovoltaïques autonomes.....	13
I.9.2.2. Système autonome avec batterie	13

I.10. Conclusion	13
Chapitre II : Généralité sur les convertisseurs DC/DC et DC des systèmes photovoltaïques	
II.1. Introduction.....	14
II.2 Les convertisseurs statiques.....	14
II.3. Convertisseurs DC/DC pour les systèmes d'énergie solaire	14
II.3.1 Définition d'un convertisseur DC/DC	14
II.3.2. Les types des convertisseurs DC-DC.....	14
II.3.2.1. Hacheur élévateur « Boostconverter »	14
II.3.2.2. Hacheur abaisseur « Buckconverter »	16
II.3.2.3 Hacheur abaisseur-élévateur « Buck-Boostconverter »	17
II.4.La commande MPPT	17
II.4.1. Définition.....	17
II.4.2 Le principe de fonctionnement de MPPT d'un générateur PV	17
II.4.3 Les différentes techniques d MPPT	17
II.4.3.1. Méthode de Perturbation et Observation (P&O)	17
II.4.3.1.1. Principe de méthode P&O	18
II.4.3.1.2. Organigramme de la méthode P&O.....	18
II.5. Convertisseurs DC/AC pour les systèmes d'énergie solaire	20
II.5.1 Définition d'un convertisseur DC/AC	20
II.5.2 Classification des onduleurs	20
II.5.2.1 Selon le nombre de phase (monophasé ou triphasé).....	20
II.5.2.1.1 Onduleur de tension monophasé en demi-pont.....	20
II.5.2.1.2 Onduleur de tension monophasé en pont H.....	21
II.5.2.1.3 Onduleur de tension triphasé	22
II.5.2.2 Selon la nature de la grandeur(tension ou courant)à transformer	24
II.5.2.2.1 Les onduleurs de tension.....	24
II.5.2.2.2 Les onduleurs de courant	24
II.5.2.3 Selon le mode de commutation de leurs interrupteurs.....	24
II.5.2.3.1 Les onduleurs autonomes.....	24
II.5.2.3.2 Les onduleurs non autonomes.....	24
II.5.3Stratégie de commande.....	24
II.5.4 Caractéristiques propres d'un onduleur pour les systèmes photovoltaïques.....	25
II.6 Critère de choix de l'onduleur	26
II.7 Conclusion.....	26
Chapitre III : Modélisation et commande de l'onduleur à 3 niveaux à structure NPC	

III.1 Introduction	27
III.2 Définition des onduleurs multi-niveaux	27
III.3 Principe de fonctionnement des onduleurs multi-niveaux	27
III.4 Les avantages et les inconvénients des onduleurs multi niveaux	28
III.4.1 Avantages.....	28
III.4.2 Inconvénients.....	28
III.5 Différents topologie des onduleurs multi-niveaux	29
III.5.1 Onduleur de tension à diode de bouclage.....	29
III.5.2 Onduleurs multi-niveaux à condensateur flottant.....	31
III.5.3 Onduleur multi niveaux en pont H cascades	32
III.5.4 Autres topologies	33
III.6 Différents stratégies de commande des convertisseurs multiniveaux	34
III.6.1 Commande par Modulation de Largeur d'Impulsions.....	34
III.6.1.1 Modulation sinusoïdale classique.....	34
III.6.1.2 Modulation sinusoïdal triangles multiples.....	34
III.6.1.3 Modulation sinusoïdale modifiée	35
III.6.2 Modulation vectorielle.....	35
III.6.3 Elimination d'Harmoniques sélective	36
III.7 Modélisation de l'onduleur à trois niveaux de type NPC.....	36
III.7.1 Structure de l'onduleur à trois niveaux	36
III.7.2 Configurations et fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux	38
III.8 Commande complémentaire.....	41
III.9.Modèle mathématique	43
III.10 La commande de l'onduleur.....	44
III.10.1 Commande en puissance	44
III.11Conclusion.....	46
 Chapitre IV : Dimensionnement et modélisation des systèmes PV raccordés aux réseaux de moyenne tension	
IV .1 Introduction	47
IV.2 Connexion au réseau.....	47
IV.3 Description générale du système	47
IV.4 Résultats de simulation	50
IV.5 Interprétation et comparaison des résultats.....	51
IV.6 Conclusion.....	56
Conclusion générale	57

Liste des figures

Chapitre I : Systèmes de production photovoltaïque

Fig I.1 Schéma équivalent du fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	4
Fig I.2 Les différents types de la cellule photovoltaïque.....	5
Fig I.3 Caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ d'une cellule photovoltaïque.....	5
Fig I.4 Caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ d'une cellule photovoltaïque.....	6
Fig I.5 Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ d'une cellule photovoltaïque.....	6
Fig I.6 Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ $P_{pv} = f(V_{pv})$ avec un éclairement de 1000W/m ²	7
Fig I.7 Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ avec un éclairement de 1000W/m ²	7
Fig I.8 Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ avec une température de 25°C.....	8
Fig I.9 Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ avec une température de 25°C.....	8
Fig I.10 Influence du changement du couplet (E, T) sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$	9
Fig I.11 Influence du changement du couplet (E, T) sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$	9
Fig I.12 Constitution d'un générateur photovoltaïque.....	9
Fig I.13 Courbe $I=f(V)$ d'une association série de cellules photovoltaïques.....	10
Fig I.14 Courbe $I=f(V)$ d'une association parallèle de cellules photovoltaïques.....	10
Fig I.15 Protection des modules photovoltaïques.....	11
Fig I.16 Schéma de principe d'une installation PV raccordée au réseau.....	12
Fig I.17 Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé	13

Chapitre II : Généralité sur les convertisseurs DC/DC et DC des systèmes photovoltaïques

Fig II.1 Circuit électrique de le hacheur 'Boost'.....	14
Fig II.2 Génération d'une valeur de rapport cyclique α	16
Fig II.3 Schéma sous Matlab/Simulink du hacheur boost.....	16
Fig II.4 Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O.....	18
Fig II.5 Organigramme de l'algorithme P & O.....	19
Fig II.6 Organigramme de l'algorithme P & O sous Matlab/Simulink.....	19
Fig II.7 Schéma de principe et la tension de sortie aux bornes de la charge d'un onduleur monophasé en demi-pont.....	20
Fig II.8 Schéma de principe et la tension de sortie d'un onduleur de tension monophasé en pont H.....	21

Fig II.9 Structure d'un onduleur triphasé à deux niveaux.....	23
Fig II.10 Représentation d'une période de commutation avec temps mort.....	23

Chapitre III : Modélisation et commande de l'onduleur à 3 niveaux à structure NPC

Fig III.1 Schéma d'un bras d'onduleurs à:(a)deux niveaux, (b) trois niveaux, (c) N niveaux.....	27
Fig III.2 Bras d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC.....	29
Fig III.3 Circuit d'une phase d'un onduleur à condensateur flottant trois niveaux.....	31
Fig III.4 Circuit d'une phase d'un onduleur en pont H cascade a)à trois niveaux b) à cinq niveaux c) à n niveaux.....	33
Fig III. 5 Onduleur triphasé à trois niveaux.....	37
Fig III. 6 Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire Transistor – diode.....	37
Fig III. 7 Un bras de l'onduleur à trois niveaux de type NPC.....	37
Fig III.8 1ere configuration du 1 ^{er} bras.....	39
Fig III.9 2eme configuration du 1 ^{er} bras.....	39
Fig III.101 3eme configuration du 1 ^{er} bras.....	40
Fig III. 11 Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à trois niveaux De type NPC.....	41
Fig III.12 Schéma synoptique de commande de la connexion au réseau.....	45
Fig III.13 Schéma bloc du contrôle des courants transités par le réseau dans le repère de Park.....	46

Chapitre IV : Dimensionnement et modélisation des systèmes PV raccordés aux réseaux de moyenne tension

Fig IV.1 Schéma global du système.....	48
Fig IV.2 Schéma équivalent d'une cellule PV modèle à une diode.....	48
FigIV.3 Tension de bus continue l'onduleur deux niveaux.....	51
Fig IV.4 Tension de bus continue l'onduleur trois niveaux NPC.....	51
Fig IV.5 Tension entre phase de l'onduleur deux niveaux.....	52
Fig IV.6 Tension entre phase de l'onduleur trois niveaux NPC.....	52
Fig IV.7 Allure des courants avant filtrage (avec l'onduleur deux niveaux).....	53
Fig IV.8 Allure des courants avant filtrage (avec l'onduleur trois niveaux NPC).....	53

Fig IV.9 Allure des tensions simples après filtrage (onduleur deux niveaux).....	54
Fig IV.10 Allure des tensions simples après filtrage (onduleur trois niveaux NPC).....	54
Fig IV.11 Allure du THD du courant à la sortie de l'onduleur deux niveaux.....	55
Fig IV.12 Allure du THD du courant à la sortie de l'onduleur trois niveaux NPC.....	55

Liste des tableaux

Chapitre I : Systèmes de production photovoltaïque

Tableau I.1 Différent types des cellules avec leur rendement.....	5
--	---

Chapitre II : Généralité sur les convertisseurs DC/DC et DC des systèmes photovoltaïques

Tableau II.1 Représentation de l'état de commutation des interrupteurs de l'onduleur monophasé en demi-pont.....	21
Tableau II.2 Représentation de l'état de commutation des interrupteurs de l'onduleur monophasé en pont H.....	23

Chapitre III : Modélisation et commande de l'onduleur à 3 niveaux à structure NPC

Tableau III.1 Nombres de composants nécessaires pour la topologie NPC à n niveaux	30
Tableau III.2 Nombres de composants nécessaires pour la topologie à condensateur flottant à N niveaux.....	32
Tableau III.3 Nombres de composants nécessaires pour la topologie cascade à n niveaux.....	33
Tableau III. 4 Table de commutation du convertisseur NPC 3 niveaux.....	40
Tableau III. 5 La table logique correspondante la commande N°1.....	42
Tableau III. 6 La table logique correspondante à la commande N°2.....	42
Tableau III. 7 La table logique correspondante à la commande N°3.....	43

Chapitre IV : Dimensionnement et modélisation des systèmes PV raccordés aux réseaux de moyenne tension

Tableau IV.1 Paramètres électriques des panneaux SIEMENS.....	49
Tableau VI.2 La valeur de la fréquence de commutation.....	50
Tableau VI.3 Paramètres électriques du transformateur.....	50
Tableau VI.4 Paramètres électriques des filtres.....	50
Tableau VI.5 Paramètres électriques du réseau.....	50
Tableau VI.6 Facteurs de distorsion de chaque type d'onduleur.....	57

PV : Photo voltaïque

Si : Silicium

Ge : Germanium

Se : Le sélénium

GaAs : Le gallium

CdTe : Le tellure de cadmium

a-Si : Silicium amorphe

P-Si : Silicium poly cristallin

m-Si : Monocristallin

DC : Courant continu (Direct current)

AC : Courant alternatif (Alternative current)

DC/DC : Hacheur

DC/AC : Onduleur

MPPT : Maximum Power Point Tracking

P&O : Perturbation et observation

MLI: Modulation largeur d'impulsion

NsVco: Courant de court-circuit de Ns cellules en série

NsIcc : La somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série

Ns : Nombre de cellule en série

Np : Nombre de cellule en parallèle

D : Diode

Rs : Résistance en série

Rp : La résistance en parallèle

R : La résistance

L : L'inductance

C : Condensateur

f : La fréquence

E : L'éclairement absorbé par la cellule

T : Température de la cellule en (K)

P : La puissance active débitée ou absorbée par la source en (W)

V_{opt} : Tension optimale

I_{opt} : Courant optimaux

S : Interrupteur

α : Rapport cyclique

I_{cc} : Le courant court-circuit

V_{co} : La tension en court-circuit ouvert

V_o : La tension à vide

D_i : Semi-conducteur non commandé (diode)

U_C : Tension principale de l'onduleur NPC

I_1, I_2, I_3 : Les courants alternatifs de la charge

I_1 : Le courant d'entrée

T : La période de modulation

T_i : Semi-conducteur commandé (IGBT, GTO)

M : Le point milieu

C : Le nombre de condensateur d'équilibrage

D : Le nombre de diode principale

Dis : Les montées en antiparallèle avec les commutateurs, avec (i=a, b, c) et (s=1, 2, 3,4 ...)

E : L Le courant à l'entrée de l'onduleur

I : La tension du bus continue à l'entrée de l'onduleur

I_s : Les courants électriques à la sortie de l'onduleur

K : Le nombre de commutateurs principaux

K_{is} : Les commutateurs dans l'onduleur

N : Le nombre de niveau de tension obtenu à la sortie de l'onduleur

S : Le nombre de source à courant continue

V_i : Les tensions aux bornes de la charge

V_{sa} : Les tensions aux bornes des condensateurs dans la topologie à cellule imbriquée

V_{a0}, V_{b0}, V_{c0} : Les tensions simples à la sortie de l'onduleur entre les phases de la charge et le point milieu o

V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} : Les tensions composées aux bornes de la charge

I_K : Le courant à la sortie de l'onduleur

K_{a1}, K_{b1}, K_{c1} : Les commutateurs en haut de l'onduleur NPC à deux niveaux triphasés de Tension

K_{a2}, K_{b2}, K_{c2} : Les commutateurs en bas de l'onduleur NPC à deux niveaux triphasés de Tension

Introduction générale

Depuis des décennies la demande en énergies ne cesse d'augmenter car elles deviennent de plus en plus indispensables et essentielles dans la vie quotidienne de tout individu puisqu'elles sont utilisées dans tous les domaines, et à toute les échelles : industrielles, transport, électricité..., et jouent un rôle majeur dans le développement technologique, cependant l'homme est toujours à la recherche de nouvelles sources d'énergie et des techniques d'exploitation de ces énergies.

Avec l'avènement de la révolution industrielle, la consommation d'énergie a principalement reposé sur l'utilisation de combustibles fossiles tels que le pétrole, le charbon, le gaz naturel, ainsi que sur l'énergie nucléaire. Cependant, il est devenu évident que ces ressources sont limitées et s'épuisent progressivement. De plus, l'utilisation intensive de ces sources d'énergie contribue largement aux problèmes climatiques que nous rencontrons aujourd'hui. La prise de conscience croissante des dangers environnementaux liés à ces processus a incité la recherche de sources d'énergie de remplacement. [1]

Les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire (photovoltaïque), éolienne et hydraulique, sont des sources d'énergie qui proviennent du soleil et se régénèrent plus rapidement qu'elles ne sont utilisées. De plus, elles peuvent être exploitées de manière autonome, car elles peuvent être utilisées sur place, là où elles sont produites. Ces énergies renouvelables représentent une solution de remplacement par excellence et sont de plus en plus utilisées de nos jours. Elles présentent plusieurs avantages, notamment le fait d'être gratuites, inépuisables et particulièrement respectueuses de l'environnement. [2]

La transition vers les énergies renouvelables est cruciale pour réduire notre dépendance aux combustibles fossiles et atténuer les effets néfastes du changement climatique. De plus, cette transition favorise la création d'emplois verts et stimule le développement économique durable. En investissant dans les énergies renouvelables, nous pouvons contribuer à la préservation de notre planète pour les générations futures. [2]

Le marché mondial des systèmes PV a connu une croissance significative au cours des dernières années grâce à des innovations technologiques, à la baisse des coûts des modules photovoltaïques et aux efforts de recherche et développement, en particulier dans le domaine de l'électronique de puissance. [1]

Les performances techniques et la robustesse des onduleurs utilisés pour le raccordement des systèmes PV aux réseaux de distribution sont essentielles pour assurer une production d'énergie électrique efficace et rentable. Les installations PV domestiques raccordées aux réseaux électriques de distribution peuvent utiliser des onduleurs classiques à deux niveaux. Cependant, l'utilisation de plusieurs de ces onduleurs peut entraîner des problèmes de qualité de l'énergie électrique, tels que l'apparition d'harmoniques dans le réseau de distribution, qui résulte de la nature intermittente de l'énergie solaire et des conditions météorologiques changeantes.

Pour remédier à ce problème, on utilise des systèmes PV centralisés à forte puissance injectée au réseau de transport ou pour alimenter des usines industrielles de forte puissance. Cela se fait via un poste de transformation MT/BT qui permet d'alimenter les citoyens.

Cependant, l'utilisation de convertisseurs conventionnels à deux niveaux à haute fréquence de commutation est limitée à ce niveau de puissance en raison des pertes non négligeables engendrées par la commutation des interrupteurs. [1]

C'est là qu'interviennent les onduleurs multiniveaux, qui sont capables de générer une tension de sortie découpée et composée d'au moins trois niveaux. Ces onduleurs présentent plusieurs avantages, notamment une meilleure qualité d'onde avec une distorsion harmonique totale (THD) très faible. De plus, en fractionnant le bus de tension continue du générateur photovoltaïque, ils aident à limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs. [2]

Dans notre travail, on traitera spécifiquement de la structure d'un onduleur de tension à neuf niveaux à structure NPC (Neutral Point Clamping). Cette topologie, selon les études réalisées, permet de générer une tension de sortie la plus proche possible d'une sinusoïde et d'améliorer le taux d'harmoniques grâce au nombre élevé de niveaux de tension offerts par la structure de ce convertisseur.

Pour ce notre travail constitue quatre chapitres divisés comme suit :

- ✓ Le premier chapitre sera consacré pour des généralités sur le photovoltaïque.
- ✓ Le deuxième chapitre présentera les convertisseurs statique DC/DC ainsi que le DC/AC, leurs types, leurs fonctionnements.
- ✓ Le troisième chapitre décrira l'ondeur trois niveaux NPC ; sa structure, son fonctionnement, sa commande...
- ✓ Le quatrième chapitre sera consacré aux résultats de la simulation et à leurs interprétations.

On terminera avec une conclusion pour définir l'ondeur le plus performant.

I.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque désigne la transformation directe de l'énergie de la lumière du soleil en énergie électrique au moyen des cellules solaires fabriquées à base du matériau semi-conducteur généralement au silicium. L'association en série et en parallèle de ces cellules donne lieu à un module photovoltaïque. Pour obtenir une puissance d'utilisation désirée, ces modules peuvent être également assemblés en série et en parallèle pour former un générateur PV. La puissance produite par le générateur PV dépend du niveau d'éclairement et de la température de jonction de la cellule.[3]

I.2 L'énergie renouvelable

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le soleil (rayonnement), mais aussi la lune (marée) et la terre (énergie géothermique).[4] Aujourd'hui, on assimile souvent par abus de langage les énergies renouvelables aux énergies propres.

I.2.1 Différentes sortes d'énergies renouvelables

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables : l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Excepté l'énergie géothermique qui provient de la chaleur des profondeurs de la terre, ces sources d'énergie proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera. L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable.[5]

I.3 L'énergie solaire photovoltaïque

Le mot « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « Photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée photovoltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839. [6]

I.3.1 Principe de la conversion photovoltaïque [5]

On appelle conversion photovoltaïque, la conversion de la lumière en électricité et cela se produit dans des matériaux semi-conducteurs. Le semi-conducteur le plus utilisé est disponible est le silicium (Si) présent dans le sable sous forme de silice et de silicates.

Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons (présence de trous), dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée alors entre elles

un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction PN a été formée.

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont « bombardés » par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être 'arrachés/décrochés' : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons 'déchirés' créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique c'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque.

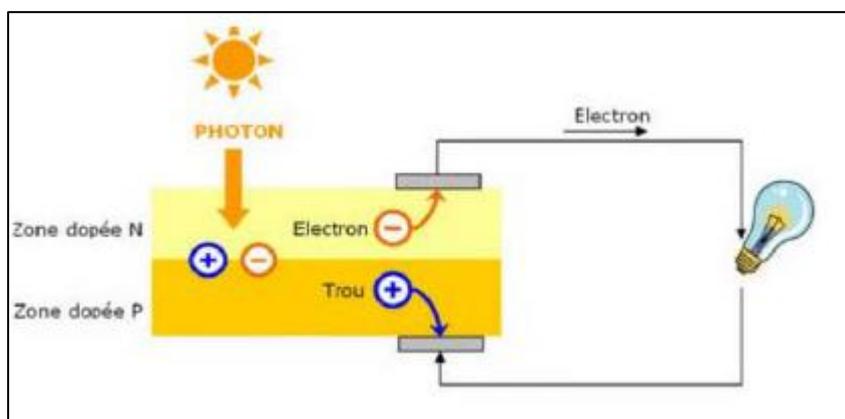


Fig I.1 Schéma équivalent du fonctionnement de la cellule photovoltaïque [8].

I.4 Différentes technologies des cellules solaires

Plusieurs techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, et cela à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), ou le tellure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication et leur utilisation est en général limitée aux applications spatiales, mais le matériau le plus utilisé reste le silicium. [9]

- **Cellules monocristallines** : Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (13 – 17% et jusqu'à 24,7 % en laboratoire) mais aussi celle qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.
- **Cellules polycristallines** : Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible.
- **Cellules amorphes** : Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que les calculatrices solaires ou encore les montres.

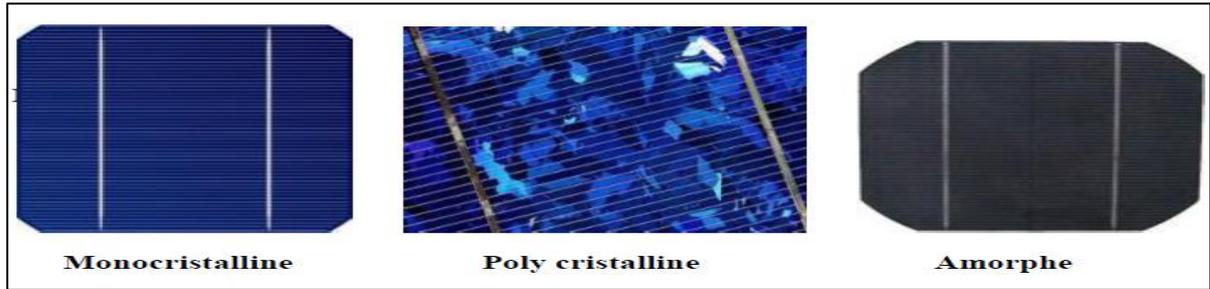


Fig I.2 Les différents types de la cellule photovoltaïque.[3]

- Le tableau suivant (1-1) présente les différents types de cellules avec leur rendement :

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement production
Silicium amorphe (a-Si)	13%	5 à 9%
Silicium poly cristallin (p-Si)	19,8%	11 à 15 %
Silicium monocristallin (m-Si)	24,7%	13 à 17%

Tableau 1.1 Différent types des cellules avec leur rendement. [10]

I.5 Caractéristiques électrique d'une cellule photovoltaïque

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension ($I_{pv}-V_{pv}$) et par une courbe tension-puissance ($P_{pv} - V_{pv}$). Trois grandeurs physiques définissent ces caractéristiques :

- La tension à vide : V_{co} (tension en circuit ouvert). Cette valeur représente la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Le courant de court-circuit : I_{cc} . Cette valeur représente le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Le **Point de Puissance Maximal** : PPM obtenu pour une tension et un courant optimal : V_{opt}, I_{opt} (parfois appelés aussi V_{ppm}, I_{ppm}).[11]

I.5.1 Caractéristique courant tension ($I_{pv}-V_{pv}$)

La caractéristique réelle est représentée sur la figure (I.3)

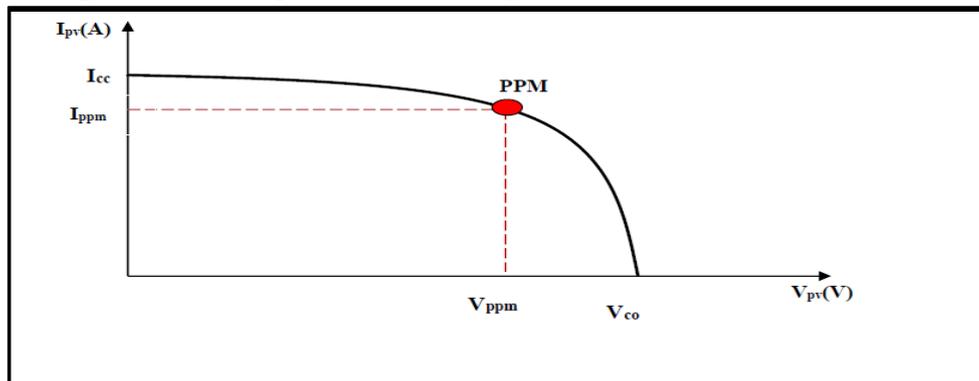


Fig I.3 Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ d'une cellule photovoltaïque.

I.5.2 Caractéristique puissance tension ($P_{pv} - V_{pv}$)

La caractéristique réelle ($P_{pv} - V_{pv}$) est représentée sur la figure (I.4)

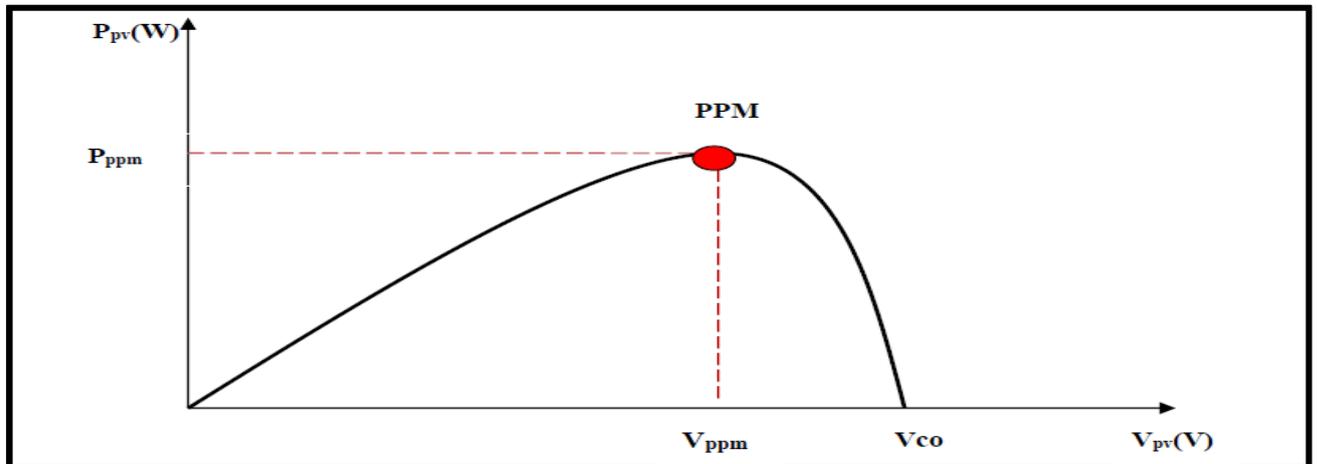


Fig I.4 Caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ d'une cellule photovoltaïque.

I.5.3 Zones de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La figure (I.5) montre les différentes zones de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque sur la caractéristique ($I_{pv}-V_{pv}$).

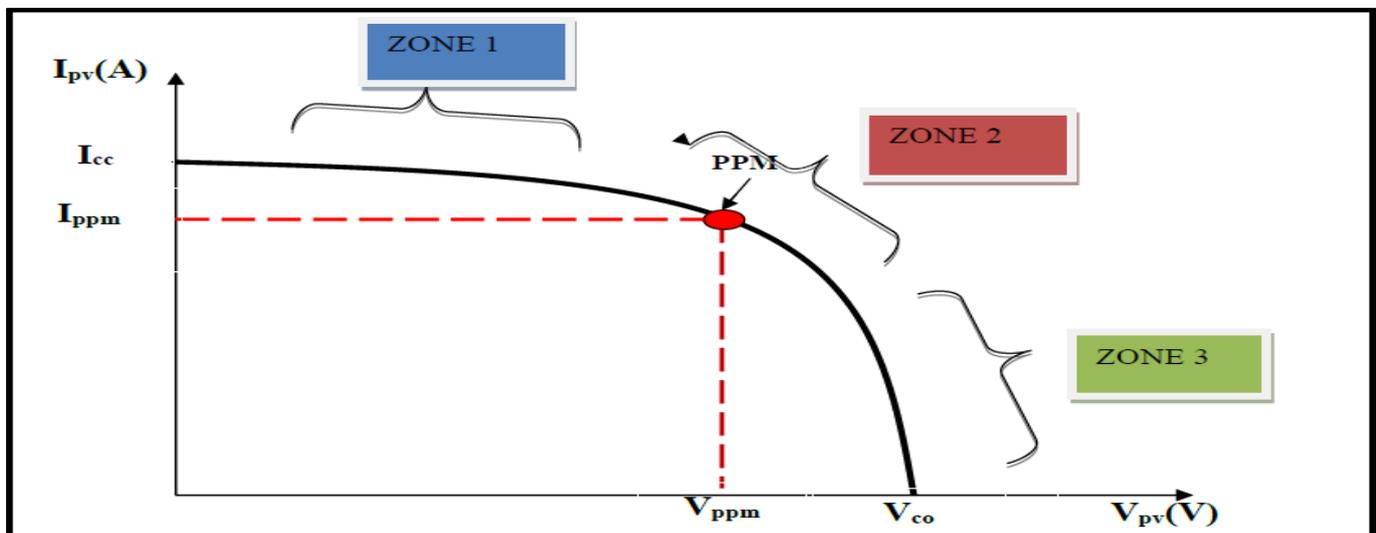


Fig I.5 Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ d'une cellule photovoltaïque.

- **Zone 1** : Le courant est quasiment constant quel que soit la variation de la tension. (La cellule se comporte comme un générateur de courant)
- **Zone 2** : C'est la zone où la cellule délivre son maximum de puissance.
- **Zones 3** : La tension est presque constante, et le courant varie. (La cellule se comporte comme un générateur de tension)

I.5.4 Influence de la température et de l'éclairement sur une cellule photovoltaïque

L'éclairement et la température dans le milieu où se situe la cellule sont les deux paramètres qui influent sur la caractéristique courant tension et par conséquent sur la puissance délivrée par la cellule.

I.5.4.1 Influence de la température

La température du milieu où se situe la cellule est un paramètre qui influence le profil de la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque. Une cellule photovoltaïque convertit une énergie radiative (rayonnement) en énergie électrique avec un rendement compris en 5 % et 16 % selon la technologie [12]. Le reste du rayonnement non-transformé en électricité est convertit en grande partie sous forme de chaleur, la fraction résiduelle étant réfléchi. Ainsi, une cellule photovoltaïque mal ventilée voit sa température monter très rapidement. La température de la cellule photovoltaïque induit un effet notable sur la tension de celle-ci.

Par contre, l'effet de la température sur le courant de la cellule photovoltaïque est négligeable. Il apparaît que plus la température du milieu de la cellule augmente, plus la tension à vide de celle-ci diminue. La puissance de la cellule étant égale au produit du courant et de la tension, la même remarque s'applique sur la courbe puissance. (Figure I.6).

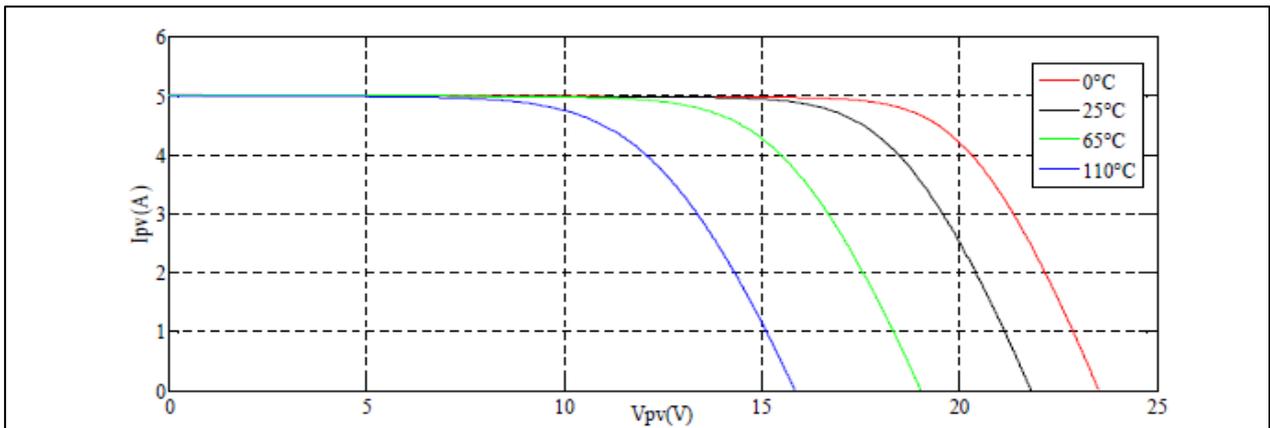


Fig I.6 Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ avec un éclairement de $1000W/m^2$.

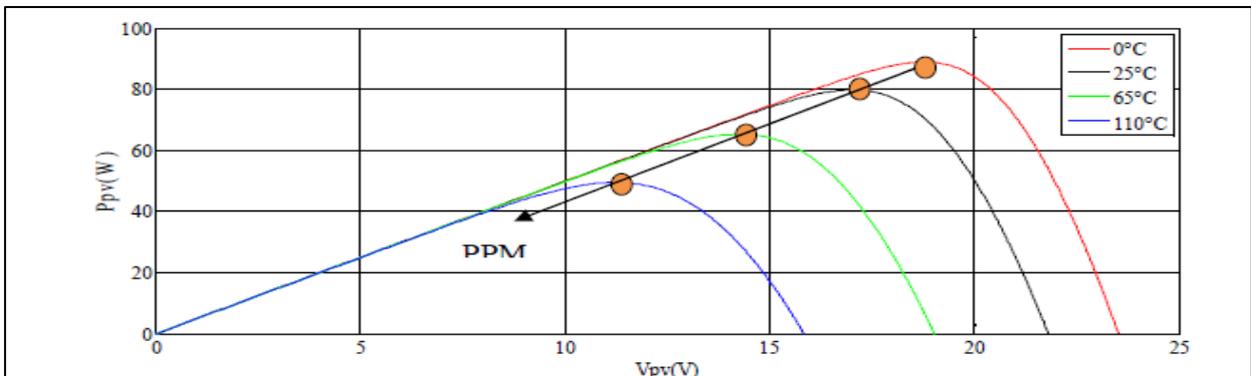


Fig I.7 Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ avec un éclairement de $1000W/m^2$.

I.5.4.2 Influence de l'éclairement

Le courant débité par la cellule dépend fortement du niveau d'éclairement. Le courant de court-circuit est directement proportionnel à l'éclairement, quant à la tension, celle-ci est peu sensible aux variations du niveau d'éclairement. [12]

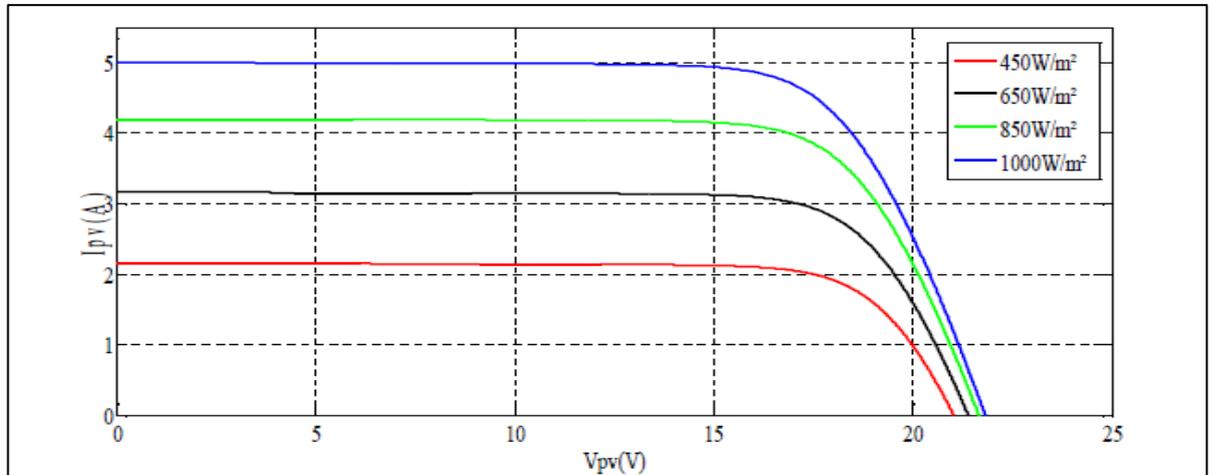


Fig I.8 Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ avec une température de 25°C.

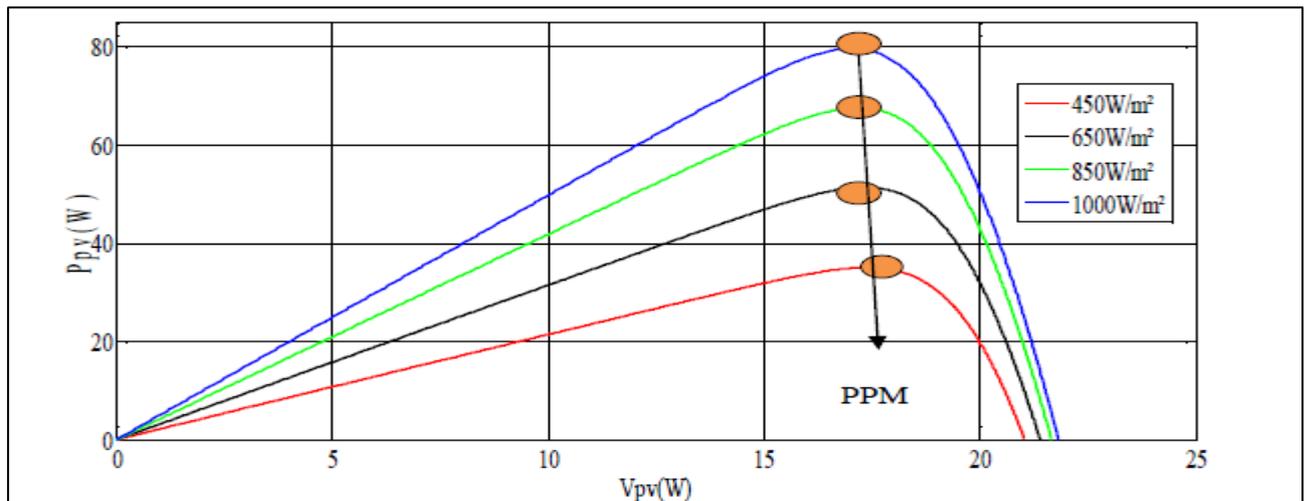


Fig I.9 Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$ avec une température de 25°C.

I.5.4.3 Influence du changement d'éclairement et de la température

L'augmentation de l'éclairement et de la température entraîne la diminution de la tension et une augmentation du courant.

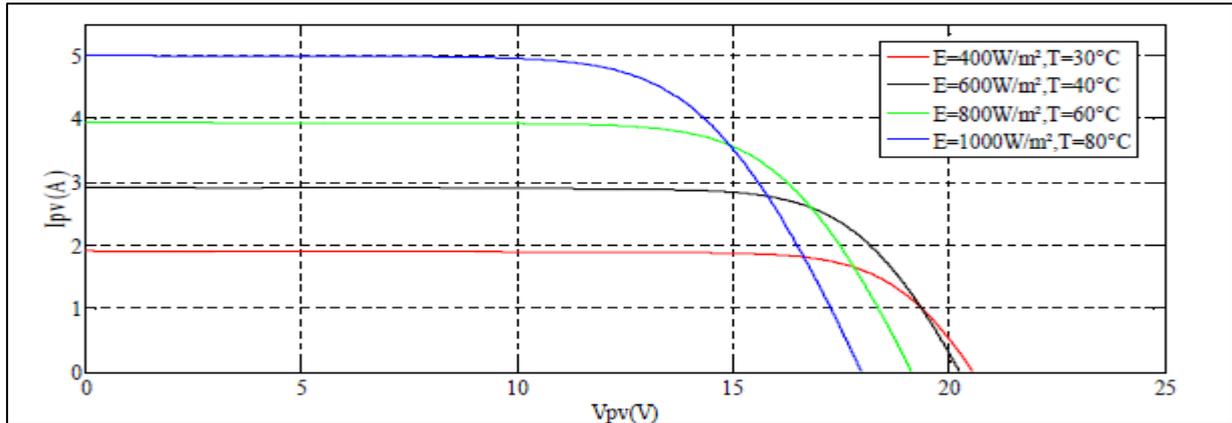


Fig I.10 Influence du changement du couplet (E, T) sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$.

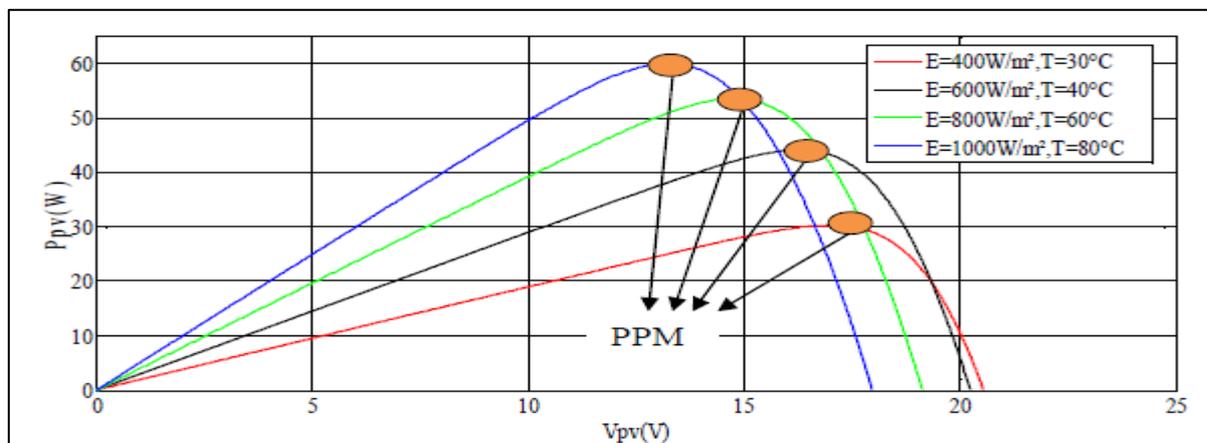


Fig I.11 Influence du changement du couplet (E, T) sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$.

I.6 Association des cellules photovoltaïques

A partir de l'association en série et/ou en parallèle on obtient un module photovoltaïque. La connexion en série augmente la tension pour un même courant alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique.[13] Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules. La figure suivante montre le passage d'une cellule à un module photovoltaïque.

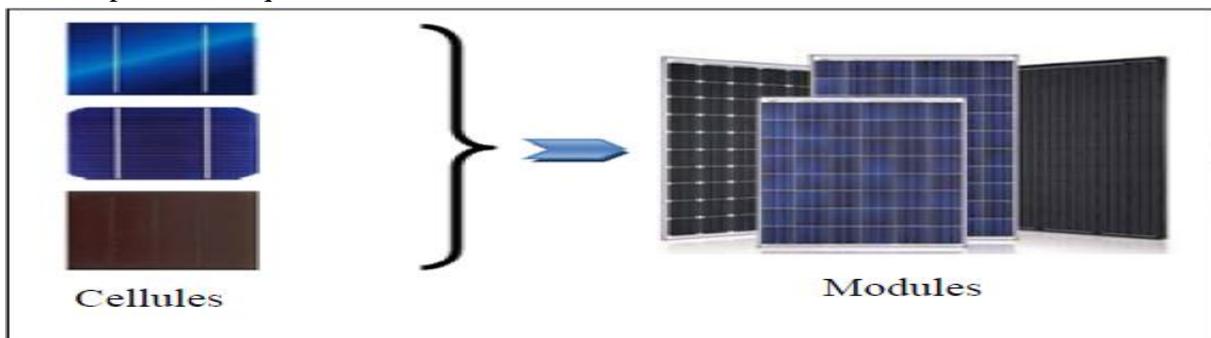


Fig I.12 Constitution d'un générateur photovoltaïque.

I.6.1 Association série

Dans un groupement en série (appelée "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. [8]

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

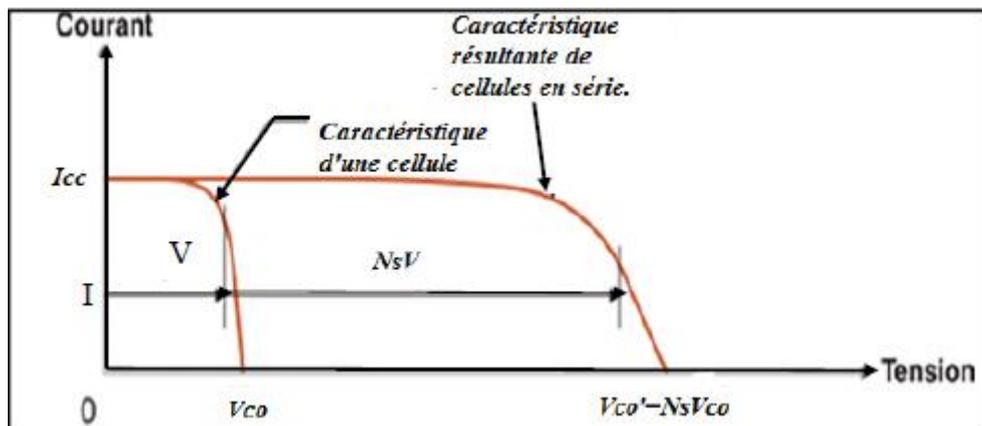


Fig I.13 Courbe $I=f(V)$ d'une association série de cellules photovoltaïques. [13]

I.6.2 Association parallèle

En additionnant des modules photovoltaïques identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module, alors que leur courant s'ajoute pour donner un courant plus important à la sortie ce qui donne naissance à un champ photovoltaïque de même tension sa caractéristique est représenté ci-dessous. [13]

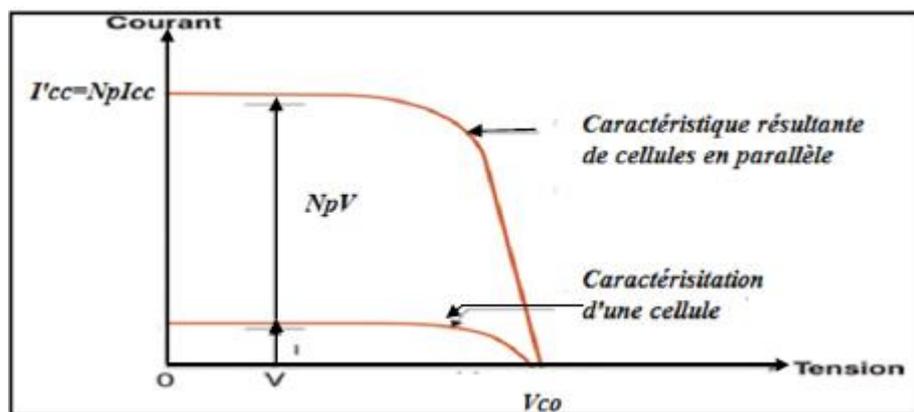


Fig I.14 Courbe $I=f(V)$ d'une association parallèle de cellules photovoltaïques. [13]

I.7 Module photovoltaïque [14]

L'assemblage de plusieurs cellules forme un module photovoltaïque et le type d'association de ces cellules (série ou parallèle) dépend de la valeur du courant et de la tension désirée à la sortie du panneau photovoltaïque mais dans le principal but et toujours d'avoir plus de puissance. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un

polymère EVA et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène. Les modules ont généralement entouré d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation.

I.8. Protection des modules photovoltaïques [15]

Il faut que toutes les photopiles soient éclairées de la même façon. En effet, une photopile ombragée ou même partiellement voit sa tension et surtout son intensité baisser considérablement.

Une perte de puissance risque de provoquer une polarisation inverse avec dissipation d'énergie dans la diode défaillante. Pour limiter la perte de puissance, on utilise une diode bypass qui se place en dérivation de la cellule pour ne pas limiter le courant de situation de déséquilibre.

De même, si tout le module est à l'ombre, une batterie bien chargée pourrait débiter dans celui-ci, ce qui serait dangereux pour la structure de photodiode quasiment incapable de dissiper de l'énergie. On introduit une diode anti-retour sur la borne + du module pour être à l'abri d'un tel ennui.

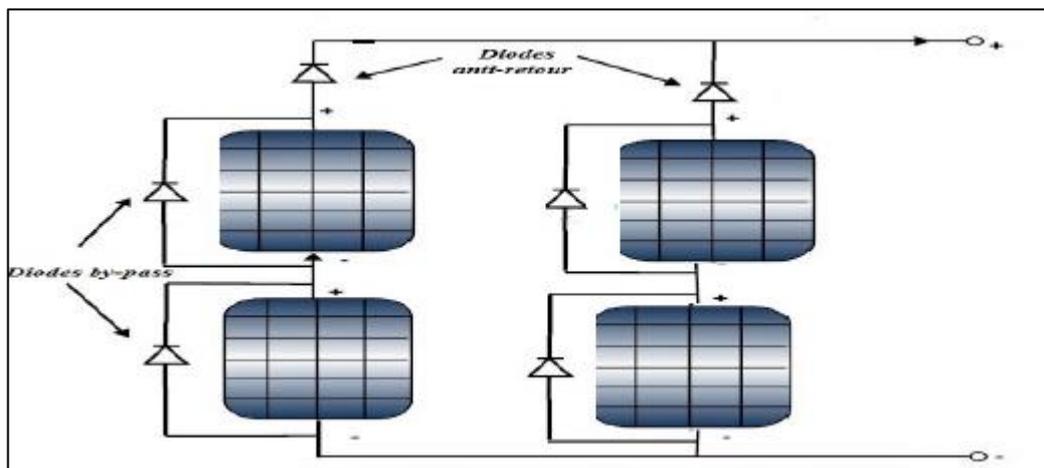


Fig I.15 Protection des modules photovoltaïques

I.9 Configuration des systèmes photovoltaïques

Il existe plusieurs configurations de systèmes photovoltaïques (PV) sont actuellement en service [1] :

- Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau (On-grid) ont le vent en poupe car ils bénéficient à l'heure actuelle de tarifs préférentiels de rachat de l'énergie dans de nombreux pays.
- Les systèmes photovoltaïques non connectés au réseau (Off-grid) sont employés lorsque le réseau de distribution est inexistant ou lorsque les coûts de connexion à ce réseau sont prohibitifs.

I.9.1 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau représentent la quasi-totalité des systèmes photovoltaïques installés en Europe, mais qui a du mal à s'imposer en Algérie à

cause de la complexité de l'installation et l'obligation de substituer le réseau classique par un système de réseau intelligent. [1]

Le choix de raccorder un système photovoltaïque au réseau de distribution d'énergie permet d'injecter tout ou une partie de la production d'électricité dans ce réseau. Ainsi, le propriétaire du système en tire un revenu par la vente de cette production au fournisseur d'énergie de son installation domestique ou industrielle. Ce choix détermine la conception et le mode de fonctionnement de l'installation photovoltaïque.

- Les panneaux solaires sont constitués de silicium et transforme la lumière en courant électrique continu.
- L'onduleur va transformer ce courant continu en courant alternatif.
- Le compteur de production va mesurer la quantité d'électricité produite par votre installation et envoyée au réseau. C'est cette production qui vous est achetée par la Sonelgaz. Pour votre consommation quotidienne, rien ne change, vous restez lié à Sonelgaz via votre abonnement de consommation. [8]



Fig I.16 Schéma de principe d'une installation PV raccordée au réseau

I.9.1.1 Exemples de structures des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau [8]

Deux types de structures de système photovoltaïque existent :

- Les systèmes à connexion directe au réseau : cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque connecté directement, à l'aide d'un onduleur au réseau électrique :
 - ✓ Structure à convertisseur unique.
 - ✓ Structure avec bus à basse tension alternative.
- Le système à bus continu intermédiaire : Le générateur photovoltaïque est connecté par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu. Un onduleur délivre une tension modulée, celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique, on obtient alors en sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau. Ce système a trois structures parmi elles :
 - ✓ Structure avec hacheur et onduleur : La figure 8 représente un hacheur qui élève la tension en sortie du module photovoltaïque en une tension de (100 V) délivrée sur le bus continu. Avec le hacheur, il est difficile d'élever la tension en sortie des modules plus de 4 à 5 fois pour obtenir une tension continue suffisamment grande, en raison de la résistance de l'inductance. On adjoint un onduleur pour avoir une sortie sinusoïdale, puis un transformateur pour élever

cette tension au niveau désiré (selon le réseau) et pour assurer l'isolation entre la partie " production " et la partie " utilisation ". L'avantage de ce système est que des batteries peuvent être facilement connectées au bus continu pour obtenir un système autonome. Le courant d'entrée est relativement lisse, c'est pour cela que la capacité peut être faible.

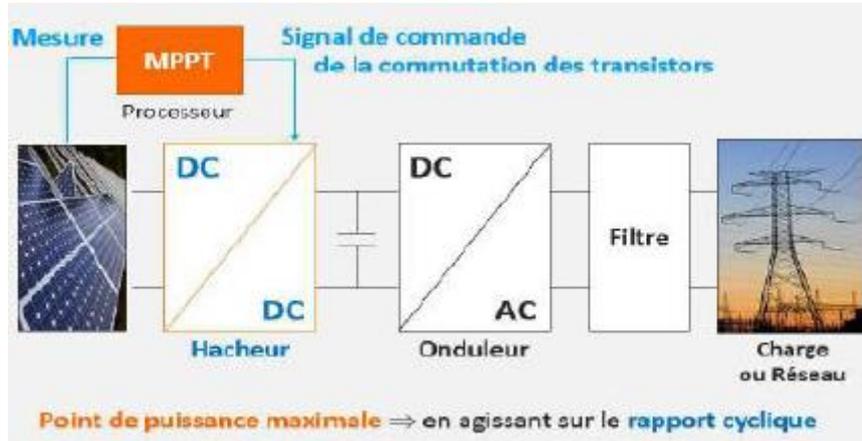


Fig I.17 Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé.

I.9.2 Systèmes photovoltaïques autonomes [2]

On distingue deux types selon les besoins de la charge :

1.9.2.1 Système autonome sans batterie

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (ex. : calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (ex. : pompage photovoltaïque : le réservoir d'eau sert de stockage).

1.9.2.2 Système autonome avec batterie

C'est le système photovoltaïque le plus commun. Le champ PV sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. (Ex. l'éclairage d'une maison dans la nuit).

I.10 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'exposer une description générale de l'énergie photovoltaïque, en expliquant son principe. Nous avons également parlé de l'influence du couplet (Ensoleillement, Température) sur la cellule photovoltaïque ainsi que les différentes configurations des systèmes photovoltaïques.

Dans ce qui suit, nous nous intéresserons aux convertisseurs électroniques (convertisseurs DC/DC et DC/AC) des systèmes photovoltaïques.

II.1 Introduction

Dans un système de conversion des énergies photovoltaïques, les convertisseurs sont utilisés pour bien adapter la source à la charge. Ces convertisseurs peuvent être en courant continu, comme dans le cas d'utilisation des MPPT pour une exploitation maximale de la puissance fournie par le générateur PV, ou en courant alternatif comme dans le cas d'utilisation des charges en courant alternatif.

On s'intéresse dans ce chapitre à l'étude des deux types de convertisseurs *DC/DC* et *DC/AC*.

II.2 Les convertisseurs statiques

Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative. [1]

II.3 Convertisseurs DC/DC pour les systèmes d'énergie solaire

II.3.1 Définition d'un convertisseur DC/DC

Les convertisseurs *DC/DC* permettent d'adapter la source d'énergie électrique a un récepteur donné, ils ont pour fonction de fournir une tension continue variables à partir d'une tension continue fixe. Cette conversion d'énergie s'effectue grâce un "découpage" haute fréquence caractérisée par un rendement élevé [1]. Ces convertisseurs peuvent être de type éleveurs de tension 'Boost' ou abaisseur de tension 'Buck' ou abaisseur-éleveur 'Buck-Boost'.

II.3.2 Les types des convertisseurs DC-DC

On distingue trois types de hacheurs :

- Hacheur éleveur « Boost converter »
- Hacheur abaisseur « Buck converter »
- Hacheur abaisseur éleveur « Buck-Boostconverter »

II.3.2.1 Hacheur éleveur « Boostconverter » [1]

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie V_s est supérieure à celle de l'entrée V_i .

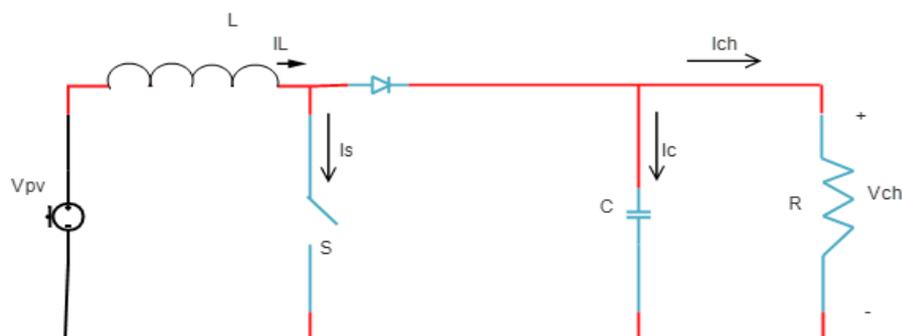


Fig II.1 Circuit électrique de le hacheur 'Boost'.

L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie. Son fonctionnement est comme suit :

Au premier temps αT , l'interrupteur S est fermé, le courant dans l'inductance croit progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. L'interrupteur S s'ouvre et l'inductance L s'oppose à la diminution de courant I_L , génère une tension qui s'ajoutera à la tension de source. Elle sera appliquée sur la charge R à travers la diode D.

D'après la figure (II.1) de l'hacheur survolteur:

- Lorsque l'interrupteur S est fermé :

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} \dots\dots\dots (II.1)$$

$$0 = C \frac{dI_{ch}}{dt} + I_{ch} \dots\dots\dots (II.2)$$

- Lorsque l'interrupteur S est ouvert :

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{ch} \dots\dots\dots (II.3)$$

$$I_L = C \frac{dI_c}{dt} + I_{ch} \dots\dots\dots (II.4)$$

En posant $u = 1$ lorsque l'interrupteur S est fermé et $u = 0$ pour S ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations unique. En valeurs moyennes, la tension de sortie est en fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique α . Son expression est donnée par l'équation (I). La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique α .

$$V_{ch} = \frac{1}{1-\alpha} V_{pv} \dots\dots\dots (II.5)$$

$$I_{ch} = (1 - \alpha) I_{pv} \dots\dots\dots (II.6)$$

Pour un rapport cyclique « α » donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne et le courant à la sortie sont donnés par [2] :

$$V_{ch} = 11 - \alpha V_e \dots\dots\dots (II.7)$$

$$I_s = (1 - \alpha) I_e \dots\dots\dots (II.8)$$

α : est appelé rapport cyclique, et compris entre 0 et 1.

Le rapport cyclique α est généré par un comparateur déposé sur la technique MLI où il résulte de l'intersection de deux signaux, l'une triangulaire et l'autre prendre une valeur varie d'après la tension cible dans la sortie d'hacheur V_s (figure II.2).

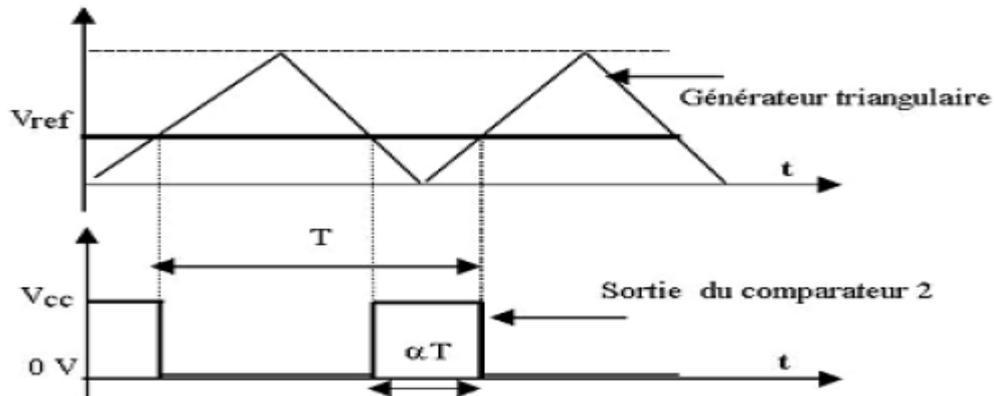


Fig II.2 Génération d'une valeur de rapport cyclique α

On s'aperçoit que le convertisseur Boost est le sujet de nombreuses réflexions et ressort le plus fréquemment dans la littérature pour une conversion DC/DC . En effet en prenant en compte les caractéristiques des différents convertisseurs DC/DC , le Boost, de par sa simplicité, son faible coût et son rendement élevé, est la structure retenue pour réaliser la plupart des convertisseurs DC/DC photovoltaïques [2].

Le schéma sous Matlab/Simulink du hacheur boost est illustré dans la figure (II.7)

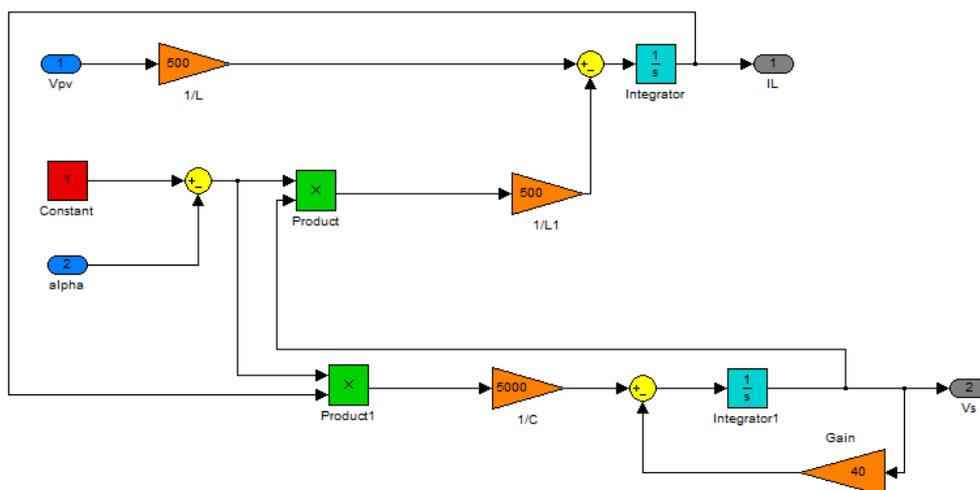


Fig II.3 Schéma sous Matlab/Simulink du hacheur boost.

II.3.2.2 Hacheur abaisseur « Buckconverter »

Le hacheur série, hacheur abaisseur ou bien dévolteur est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant [17].

II.3.2.3 Hacheur abaisseur-élevateur « Buck-Boostconverter »

Hacheur abaisseur-élevateur est aussi appelé dévolteur-survolteur ou de type Buck-Boost. Le hacheur abaisseur-élevateur est un convertisseur indirect $DC-DC$ à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec

une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents [18].

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

II.4 La commande MPPT

II.4.1 Définition

La commande *MPPT* est une méthode permet au générateur *PV* de travailler à sa puissance maximale quel que soit les conditions météorologiques d'irradiations et de température. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α d'un convertisseur *DC – DC* à la valeur adéquate de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau *PV* [19].

II.4.2 Le principe de fonctionnement de MPPT d'un générateur PV :

Un *MPPT*, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur *MPPT* permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant [20].

II.4.3 Les différentes techniques d MPPT :

Afin d'extraire Le maximum de puissance d'un panneau solaire, on peut raisonner sur plusieurs et différentes méthodes, Certains des concepts sont très robustes et simples, tandis que d'autres approches exigent des dispositifs de logique très sophistiqués tels que des micro-processeurs combinés avec des circuits de puissance, de convertisseurs de commutation. En littérature on trouve fréquemment les techniques de maximisation de puissance suivantes [20] :

- Perturbation et observation. (*P&O*).
- La méthode incrémentation de la conductance.
- Méthode de capacité parasite.

Chacune de ces techniques à ces propres avantages et inconvénients du point de vue simplicité, efficacité et robustesse. [20]

Dans notre travail, on se limite à la méthode de Perturbation et Observation (*P&O*), qui est très simple d'implantations et le rendement élevé.

II.4.3.1. Méthode de Perturbation et Observation (*P&O*)

Parce qu'elle est simple et ne nécessite que des mesures de la tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{pv} et I_{pv} , la méthode *P&O* est une approche largement acceptée dans la recherche *MPPT*. Il peut localiser le point de puissance maximum même lors de variations d'éclairement et de température.

La méthode *P&O* est consisté à perturber la tension et à observer l'influence de ce changement sur la puissance de sortie du panneau solaire chaque instant. [21]

II.4.3.1.1. Principe de méthode P&O

L'idée de base des instructions *MPPT* de type *P&O* est de perturber la tension V_{PV} de faible amplitude autour de sa valeur initiale puis d'examiner le comportement de la variation de puissance P_{vp} qui en résulte, comme le montre la Figure II.4.

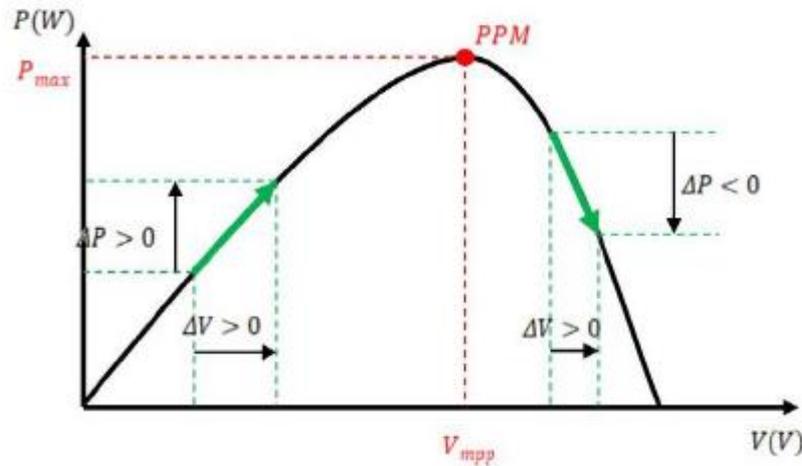


Figure II.4 Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O.

- A. Si $\Delta P > 0$, la perturbation de tension déplace le point de fonctionnement plus près du PPM, et nous continuons à perturber la tension de la même manière. Le point opérationnel sera ainsi déplacé jusqu'à ce que le PPM soit atteinte ;
- B. Si $\Delta P < 0$, indique que le point de fonctionnement s'éloigne du PPM, on perturbe la tension avec un signe algébrique opposé au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à ce qu'il atteigne le PPM.

II.4.3.1.2. Organigramme de la méthode P&O

La figure (II.5) montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode *P&O*, tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle.

D'après celle-ci, la tension et le courant V et I , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante $P(k)$ de la rangée. Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur $P(k-1)$ de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle. Avec cet algorithme, la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle du *MPPT*. Dès que le *MPP* sera atteint, V oscillera autour de la tension idéale V_{mp} de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur dupas d'une perturbation simple C_p . [22]

- Si C_p est grande, l'algorithme du *MPPT* répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou légèrement changeantes.
- Si C_p est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes Seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation. La valeur C_p idéale dépend du système. Elle doit être déterminée expérimentalement. [23]

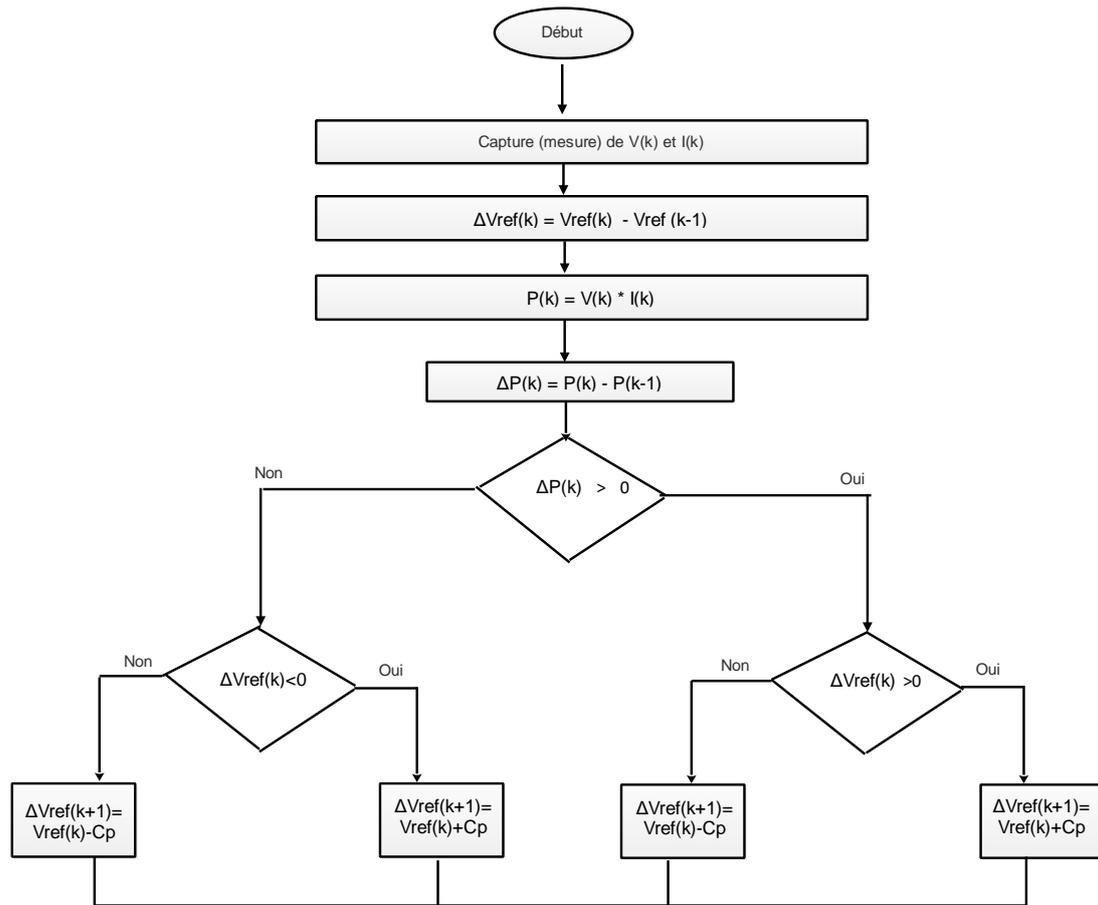


Fig II.5 Organigramme de l'algorithme P & O

Le schéma sous Matlab/Simulink de cette méthode est illustré dans la figure (II.6)

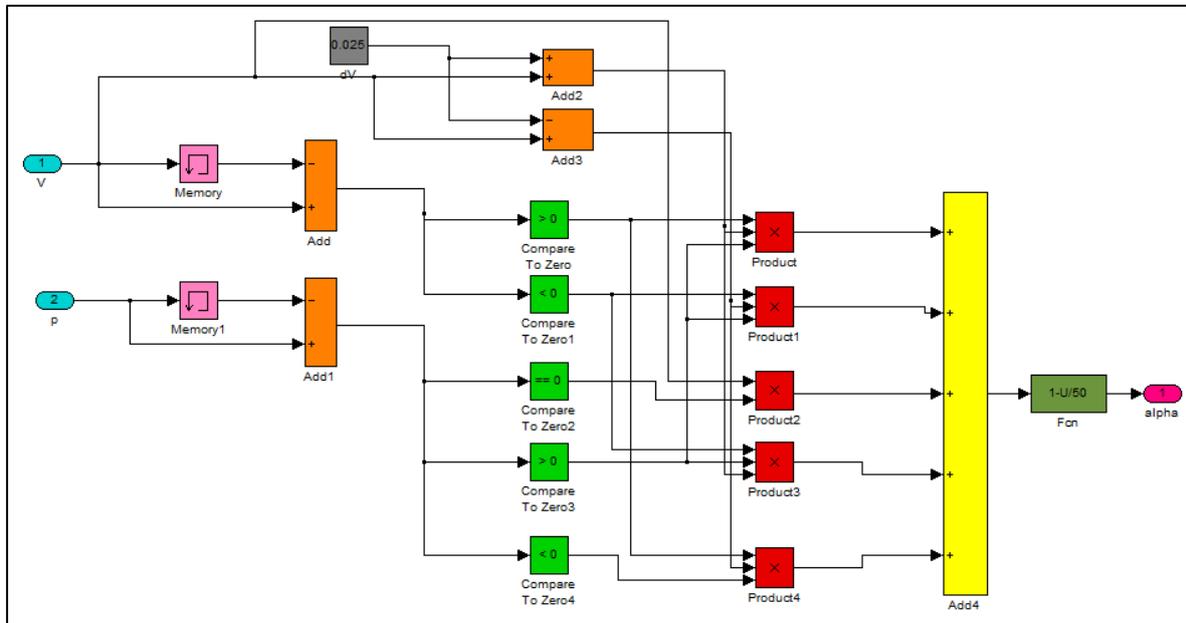


Fig II.6 Schéma de l'algorithme P & O sous Matlab/Simulink

II.5. Convertisseurs DC/AC pour les systèmes d'énergie solaire

II.5.1 Définition d'un convertisseur DC/AC

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (*DC*) à la forme alternative (*AC*). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande. [24]

II.5.2 Classification des onduleurs

Les onduleurs sont classés en fonction du nombre de phase (monophasé ou triphasé), en fonction de la grandeur (tension ou courant) à transformer et enfin en fonction du mode de commutation des semi-conducteurs utilisé.

II.5.2.1 Selon leur nombre de phase (monophasé ou triphasé)

II.5.2.1.1 Onduleur de tension monophasé en demi-pont [25]

Ce type d'onduleurs délivre à sa sortie une tension alternative monophasée, on distingue deux types d'onduleurs monophasés suivant leur topologie. La figure suivante (II.8) représente le schéma de principe et la tension de sortie aux bornes de la charge *RL* de l'onduleur monophasé en demi-pont :

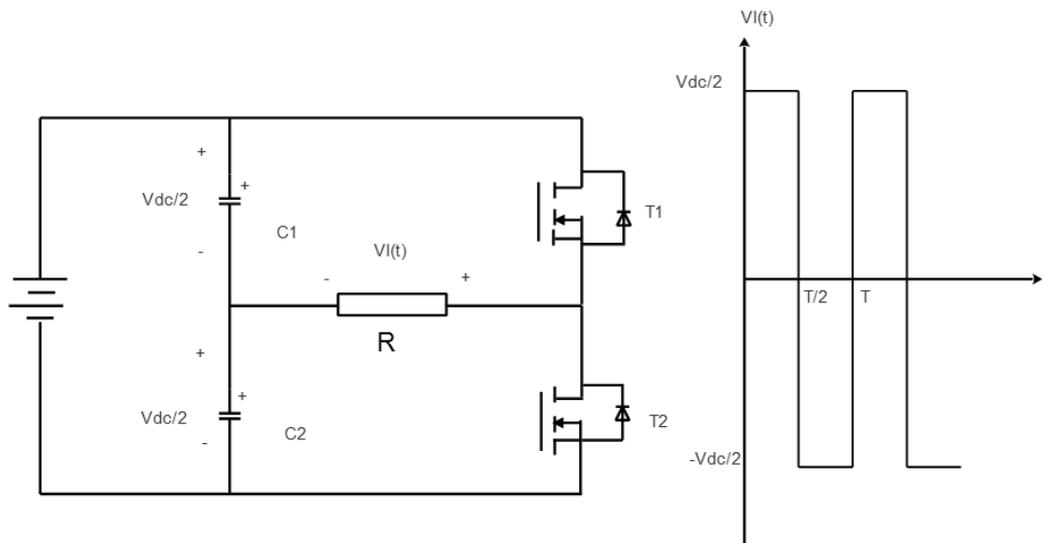


Fig II.7 Schéma de principe et la tension de sortie aux bornes de la charge d'un onduleur monophasé en demi-pont.

L'onduleur monophasé en demi pont est constitué d'un seul bras qui contient deux interrupteurs de puissance noté T_1 et T_2 à commande complémentaire, les interrupteurs de puissance peuvent être des *MOSFET*, *IGBT*, etc. Deux diodes montées en antiparallèle sur les interrupteurs permettant à la bobine de restituer l'énergie emmagasinée lors de l'ouverture des interrupteurs.

• **Le principe de fonctionnement**

Dans ce circuit l'opération de commutation des interrupteurs T_1 et T_2 est effectuée de telle sorte que si la première est ouverte l'autre est nécessairement fermé et inversement.

- ✓ Sur la première demi période ($0 \leq t \leq \frac{T}{2}$), l'interrupteur T_1 est fermée (T_2 ouvert), la tension au borne de la charge inductive RL est : $V_L(t) = \frac{V_{dc}}{2}$
- ✓ Sur la deuxième demi période ($\frac{T}{2} \leq t \leq T$), quand l'interrupteur T_2 est fermé (T_1 ouvert), la tension $V_L(t) = \frac{-V_{dc}}{2}$
- ✓ La fermeture des deux interrupteurs T_1 et T_2 en même temps provoque un court-circuit de la tension d'entrée V_{dc} , ce qui résulte en un flux de courant élevé qui est très nocif pour les interrupteurs de puissance. Le tableau (II.1) suivant présente les états de commutations des interrupteurs :

T_1	T_2	V_L
ON	OFF	$\frac{V_{dc}}{2}$
OFF	ON	$\frac{-V_{dc}}{2}$

Tableau II.1 Représentation de l'état de commutation des interrupteurs de l'onduleur monophasé en demi-pont.

II.5.2.1.2 Onduleur de tension monophasé en pont H [25]

La figure (II.9) représente un onduleur monophasé en pont H et sa forme de tension de sortie aux bornes de la charge RL :

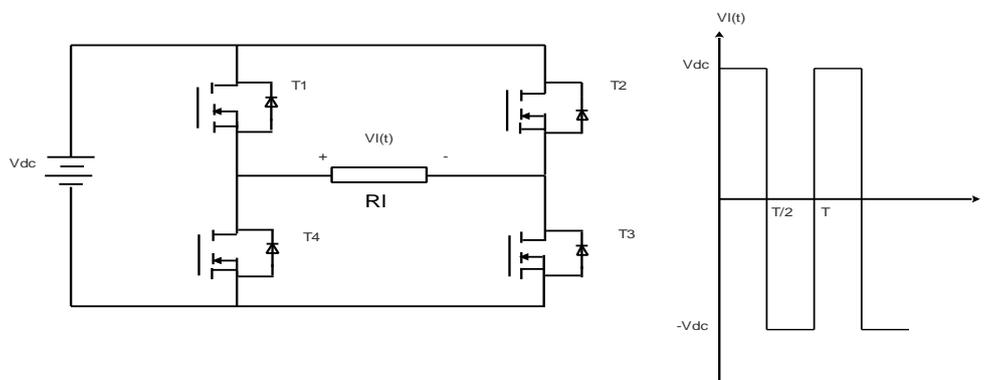


Fig II.8 Schéma de principe et la tension de sortie d'un onduleur de tension monophasé en pont H.

Cet onduleur est composé de deux bras, chaque bras contient deux interrupteurs avec une diode montée en antiparallèle, les diodes antiparallèles assurent la réversibilité du courant dans la charge.

• **Principe de fonctionnement**

La commande de l'onduleur monophasé en pont H est établie comme suit :

- ✓ Quand les interrupteurs T_1 et T_3 sont fermés pendant la première demi période ($0 \leq t \leq \frac{T}{2}$), les interrupteurs T_2 et T_4 sont ouverts. A ce moment la tension de sortie aux bornes de la charge égale à V_{dc} .
- ✓ Quand les interrupteurs T_2 et T_4 sont fermés pendant le reste de la période ($T/2 \leq t \leq T$), les interrupteurs T_1 et T_3 sont ouverts, la tension de sortie aux bornes de la charge devient $-V_{dc}$.
- ✓ Donc la tension de sortie alterne entre la borne positive et négative durant la première et seconde demi-période respectivement.

Pour éviter le problème de court-circuit de la tension d'entrée, un temps mort est respecté entre deux commutations.

Le tableau (II.2) ci-dessous représente l'état de commutation des interrupteurs de l'onduleur monophasé à pont :

T_1	T_2	T_3	T_4	$V_L(t)$
ON	OFF	ON	OFF	V_{dc}
OFF	ON	OFF	ON	$-V_{dc}$
ON	ON	OFF	OFF	0
OFF	ON	ON	OFF	0

Tableau II.2 Représentation de l'état de commutation des interrupteurs de l'onduleur monophasé en pont H.

II.5.2.1.3 Onduleur de tension triphasé [26]

L'onduleur triphasé à deux niveaux est généralement utilisé pour les applications de moyennes puissances, la structure de cet onduleur peut être obtenue par la mise en parallèle de trois onduleurs monophasés en demi-pont comme représenté à la figure (1.9). Chaque bras contient deux interrupteurs complémentaires en commande pour que la tension d'entrée ne soit jamais en court-circuit. Ce type d'onduleur est très utilisé avec la MLI

pour l'alimentation des récepteurs triphasés équilibrés à tension et fréquence variables, chacune des trois tensions de sortie est décalées de $\frac{2\pi}{3}$ l'une par rapport à l'autre.

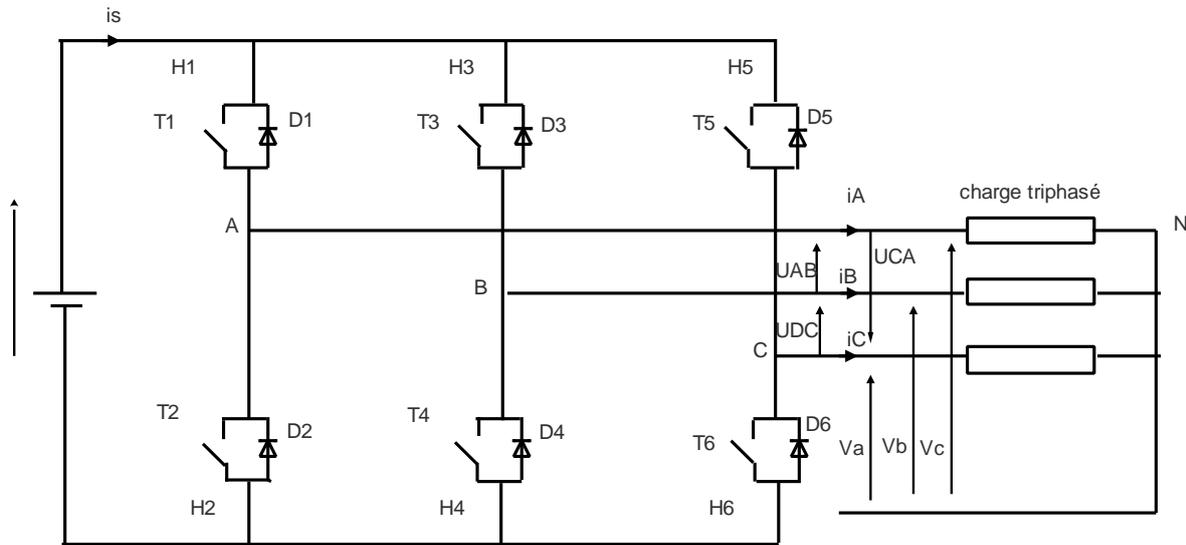


Fig II.9 Structure d'un onduleur triphasé à deux niveaux.

Les caractéristiques de l'onduleur sont principalement définies par ces composants de puissance. Ceux-ci déterminent la puissance, la tension et le courant maximum commutés, aussi, la fréquence maximale de commutation et le temps mort. Ces deux dernières caractéristiques sont très importantes car elles vont influencer la conception.

La fréquence maximale de commutation est déterminée par les temps de commutation (temps d'ouverture et de fermeture des interrupteurs), et par le temps mort qui sert à prévenir les risques de courts-circuits sur un bras entre l'ouverture d'interrupteur et la fermeture de son complémentaire.

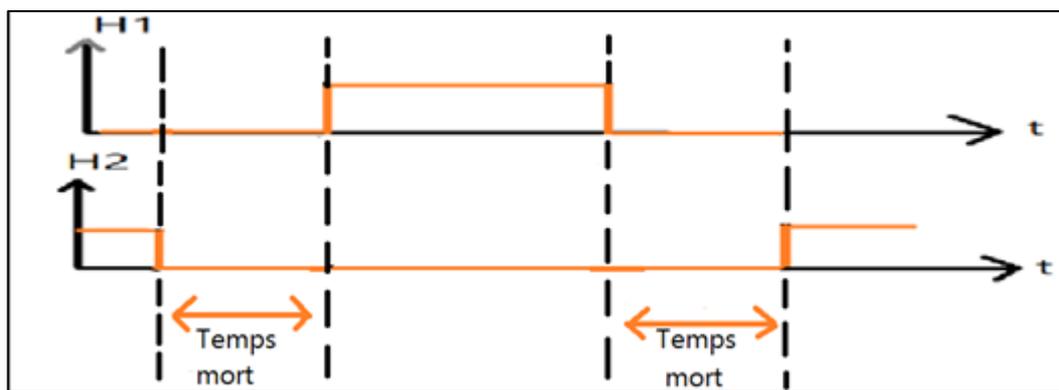


Fig II.10 Représentation d'une période de commutation avec temps mort.

II.5.2.2 Selon la nature de la grandeur (tension ou courant) à transformer

II.5.2.2.1 Les onduleurs de tension [25]

Les onduleurs de tension reliant une source de tension continue de faible impédance à une source de courant alternative utilisent des interrupteurs électroniques réversibles en courant. Ils fournissent une tension de sortie de fréquence fixe ou variable selon les besoins du système. La tension de sortie ne dépend pas de la charge contrairement au courant de sortie qui lui en dépend. Les onduleurs de tension sont généralement utilisés dans le domaine industriel pour la commande des moteurs de moyennes et grandes puissances.

II.5.2.2.2 Les onduleurs de courant [25]

L'onduleur de courant est placé entre une source de courant continue et une source de tension alternative. Ce type d'onduleur utilise des semi-conducteurs de puissance unidirectionnels en courant et bidirectionnels en tension. Il fournit à sa sortie un courant de valeur efficace réglable qui est indépendant de la charge contrairement à la tension de sortie qui en dépend quant à elle. Les onduleurs de courant sont surtout utilisés dans les entraînements à vitesse variable de moteur à courant alternatif.

II.5.2.3 Selon le mode de commutation de leurs interrupteurs [27]

II.5.2.3.1 Les onduleurs autonomes

Les onduleurs autonomes sont constitués d'interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture et dont les instants de commutations sont imposés par des circuits externes. Dans ce cas, on peut commander la fréquence de la tension de sortie de l'onduleur.

II.5.2.3.2 Les onduleurs non autonomes

Les onduleurs non autonomes sont constitués de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est dite « naturelle » contrairement à l'onduleur autonome.

L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour les moteurs synchrones de très forte puissance, de l'ordre des Mégawatts.

II.5.3 Stratégie de commande [2]

Les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (Pulse Width Modulation) qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale. Avec ce système de MLI, on obtient :

- Un rendement élevé sur une large plage de la charge.
- De faibles pertes à vide.

Les signaux de commande des interrupteurs sont déterminés par l'intersection d'une référence sinusoïdale appelée "modulatrice" de fréquence f avec une triangulaire de haute fréquence f_p appelée "porteuse". On définit par conséquent deux indices :

- Indice de modulation de fréquence : $M_f = \frac{f_p}{f}$
- Indice de réglage de tension m_a compris entre 0 et 1 : $m_a = \frac{V_m}{V_p}$

Le module PWM, servant à générer un signal modulé en largeur d'impulsion (PWM), dont le rapport cyclique (α) est modifiable par le programme du PIC ou par une commande analogique.

II.5.4 Caractéristiques propres d'un onduleur pour les systèmes photovoltaïques

[2]

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. Donc la principale caractéristique de l'onduleur *PV* est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système. En effet, le générateur *PV* a une courbe caractéristique I_V non linéaire.

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.

Donc, un système de régulation soit obligatoire pour maintenir la tension et la fréquence aux valeurs nominales de réseau, quelle que soit la tension d'entrée et aussi un filtrage en sortie de l'onduleur, qui tend à lisser la forme de la tension donc à réduire le taux d'harmonique.

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques diffèrent quelque peu des onduleurs classiques en électrotechnique, mais l'objectif de conversion *DC/AC* est le même. La principale caractéristique de l'onduleur *PV* réside dans la recherche du point de fonctionnement maximal ou *MPPT* en anglais « Maximum Power Point Tracking » car le générateur *PV* a une caractéristique courant/tension non-linéaire.

II.6 Critère de choix de l'onduleur

Le rapport de puissance des onduleurs sur celui du champ PV doit être compris entre 90 et 150 %. Ce rapport peut varier en fonction de l'orientation du système.

- La tension des modules à 70°C doit être supérieure à la tension d'entrée minimale de l'onduleur.
- La tension des modules à -10°C doit être inférieure à la tension maximale de fonctionnement de l'onduleur la tension court-circuit des modules à -10°C doit être inférieure à la tension maximale acceptable par l'onduleur.
- Le courant court-circuit maximal des modules doit être inférieur au courant maximal d'entrée acceptable par l'onduleur.

II.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté et exposé les différents convertisseurs à savoir *DC/DC* et *DC/AC*. Pour les premiers nous avons illustré une méthode utilisée pour la commande du *MPPT*. Pour les seconds convertisseurs, on a donné ses différents types ainsi que la stratégie de commande.

Vu que la gamme d'utilisation des onduleurs à deux niveaux est limitée en tension nous allons essayer de rechercher une alternative technique qui remédiera à cette limitation lors des installations de fortes puissances *PV*.

Dans notre étude, on propose comme une solution les onduleurs multi-niveaux qui ils seront étudiés en détails dans le chapitre qui suit.

III.1 Introduction

Avec le développement de l'électronique de puissance et des composants à semi-conducteurs, la technique des onduleurs multi niveaux représente un domaine de recherche important, ce dernier lié également à des tensions plus élevées. D'autre part, on cherche à obtenir des grandeurs de sortie ayant une meilleure définition, c'est-à-dire présentent un contenu harmonique réduit. Il existe plusieurs topologies de la conversion multi niveaux.

Dans ce chapitre, nous allons étudier en détail l'onduleur de tension à trois niveaux de type NPC (neutral point clamping). Ce dernier permet d'augmenter la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque à la charge grâce à sa topologie. Ainsi, il permet de générer une tension la plus sinusoïdale possible, et d'améliorer le taux d'harmoniques grâce au nombre élevé de niveaux de tension offert par la structure de ce nouveau convertisseur.

III.2 Définition des onduleurs multi-niveaux

En électronique de puissance, un convertisseur multi-niveau, également appelé convertisseur modulaire multi-niveaux, est un dispositif qui permet de générer des tensions de sortie avec une forme d'onde sinusoïdale ou quasi-sinusoïdale. Il est constitué de plusieurs niveaux de tensions accessibles en sortie, ce qui offre plus de possibilités pour réguler la tension de sortie du convertisseur.

Chaque niveau dans un convertisseur multi-niveaux correspond à une tension spécifique générée par des éléments de commutation. Ces éléments peuvent être des semi-conducteurs tels que des transistors ou des thyristors. Les tensions aux bornes de ces éléments de commutation, généralement appelées demi-cellules, sont combinées pour obtenir la tension de sortie souhaitée [28].

III.3 Principe de fonctionnement des onduleurs multi-niveaux

La figure (III.1) représente le schéma de base d'un seul bras d'onduleurs de différents niveaux, dont les semi-conducteurs sont remplacés par des interrupteurs idéaux.

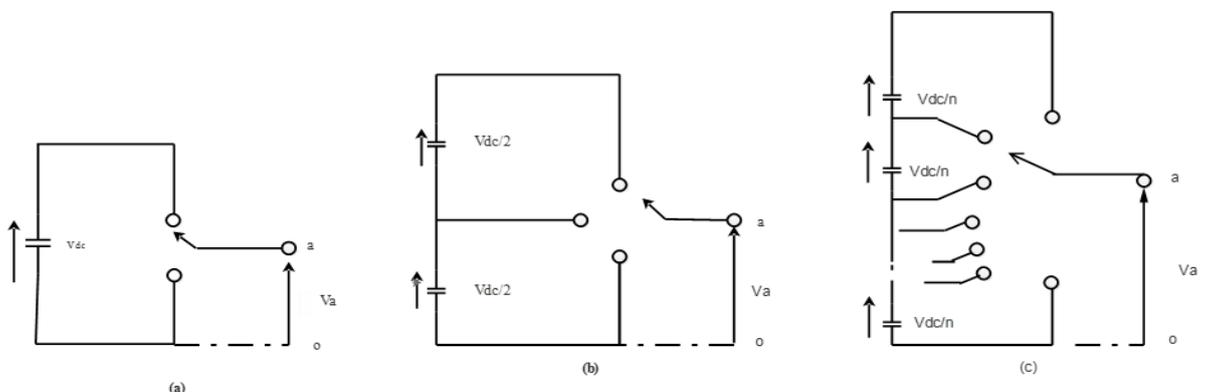


Fig III.1 Schéma d'un bras d'onduleurs à : (a) deux niveaux, (b) trois niveaux, (c) n niveaux.

L'onduleur à deux niveaux génère une tension de sortie pivotante entre deux valeurs (deux niveaux) qui sont : V_{dc} de la source (fig. III.1.a), alors que l'onduleur trois niveaux qui est représenté par la figure (III.1.b) génère trois niveaux de tension à sa sortie ($\frac{V_{dc}}{2}$, 0 , $-\frac{V_{dc}}{2}$), et ainsi de suite pour l'onduleur n niveaux (fig.III.1.c).

En élevant le nombre de niveaux de l'onduleur, les tensions de sortie ont plusieurs niveaux induisant une forme d'onde de plus en plus proche d'une sinusoïde échantillonnée. Par conséquent, en comparant avec l'onde de tension de sortie de l'onduleur deux niveaux, celle des onduleurs multi niveaux ont un taux de distorsion plus réduit et donc une moindre pollution harmonique [29].

III.4 Les avantages et les inconvénients des onduleurs multi niveaux [25]

III.4.1 Avantages

- Qualité de la tension de sortie : Les onduleurs multi-niveaux produisent une tension de sortie avec une forme d'onde plus proche d'une sinusoïde pure. Cela réduit les harmoniques présents dans la tension de sortie et améliore la qualité de l'alimentation électrique. Cela peut être particulièrement important dans les applications sensibles aux variations de tension, telles que les systèmes de transmission d'énergie ou les équipements électroniques délicats.

- Rendement élevé : Les onduleurs multi-niveaux peuvent atteindre des rendements élevés en raison de la réduction des pertes d'énergie par rapport aux convertisseurs traditionnels à deux niveaux. Les pertes par commutation sont réduites grâce à l'utilisation de tensions intermédiaires, ce qui se traduit par une meilleure efficacité globale du système.

- Tension de sortie réglable : Les onduleurs multi-niveaux offrent des degrés de liberté pour contrôler la tension de sortie. Cela permet d'ajuster plus précisément les caractéristiques de sortie, tels que l'amplitude, la fréquence et la forme d'onde, en fonction des exigences spécifiques de l'application.

III.4.2 Inconvénients

- Complexité de conception : Les onduleurs multi-niveaux nécessitent une conception plus complexe que les onduleurs traditionnels à deux niveaux en raison du nombre accru de niveaux de tension.

- Coût élevé : En raison de leur complexité et de leur conception avancée, les onduleurs multi-niveaux peuvent être plus coûteux à fabriquer que les onduleurs conventionnels à deux niveaux.

- Contrôle plus complexe : La commande des onduleurs multi-niveaux est plus complexe en raison du nombre de niveaux et des interactions entre eux. Cela nécessite des algorithmes de commande plus sophistiqués et des stratégies de modulation avancées, ce qui peut augmenter la complexité du système de commande.

Malgré ces inconvénients, les onduleurs multi-niveaux offrent de nombreux avantages qui les rendent attrayants pour de nombreuses applications nécessitant une haute qualité de la tension d'alimentation et un contrôle précis de la tension de sortie.

III.5 Différents topologie des onduleurs multi-niveaux

L'objectif de cette partie est de donner un aperçu général des trois topologies de base des onduleurs multi-niveaux :

- La topologie à diode de bouclage (NPC) ;
- La topologie à condensateur flottant ;
- La topologie en cascade.

III.5.1 Onduleur de tension à diode de bouclage

Un onduleur de tension à diode de bouclage, également connu sous le nom d'onduleur diode-clamp ou d'onduleur à trois niveaux NPC (Neutral Point Clamped), est un type d'onduleur multi-niveaux utilisé pour convertir une tension continue en une tension alternative de qualité.

Dans un onduleur de tension à diode de bouclage, chaque bras de l'onduleur est composé de deux interrupteurs bidirectionnels (généralement des transistors) et de deux diodes. La configuration typique utilise trois bras de conversion pour former un onduleur à trois niveaux.

Le fonctionnement de l'onduleur de tension à diode de bouclage repose sur le principe du bouclage du point neutre (clamping) pour générer des tensions de sortie de différentes polarités. Les diodes de bouclage sont connectées entre les points neutres des interrupteurs et le point médian du système, créant ainsi des niveaux de tension supplémentaires [30].

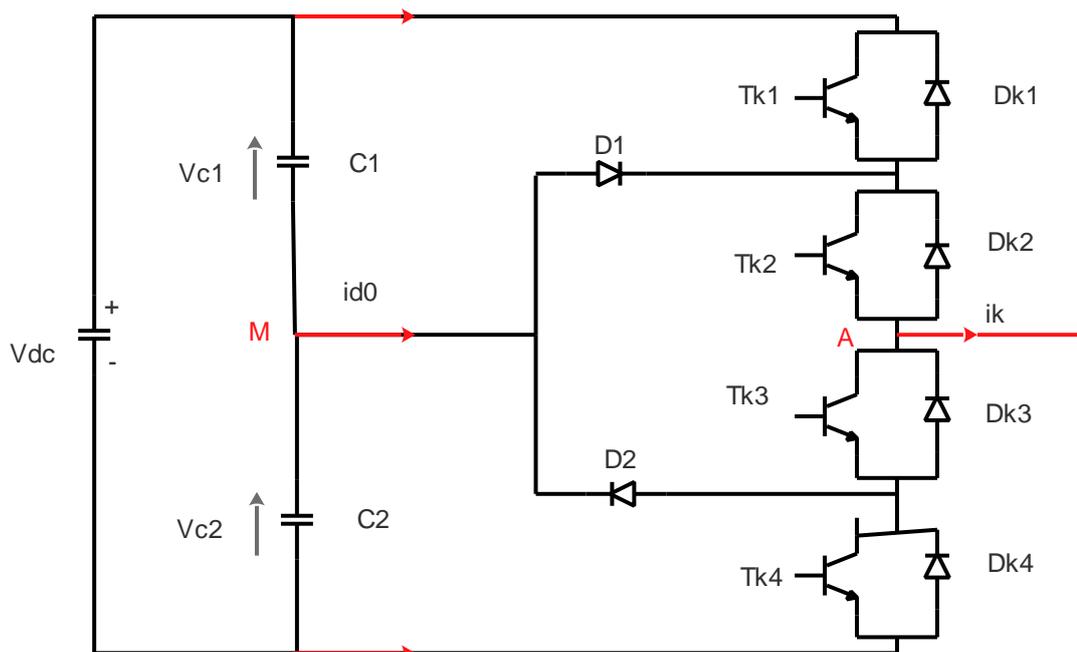


Fig III.2 Bras d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC

Les diodes sont utilisées pour réaliser la connexion avec le point de référence. Pour l'obtention d'une tension de N niveaux, N-1 condensateurs sont nécessaires. Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à $\frac{V_{dc}}{N-1}$.

V_{dc} étant la tension d'entrée totale appliquée.

Topologies	N	S	K	D	Dc	C
NPC à diode de bouclage	N	(n-1)	2(n-1)	2(n-1)	(n-1)(n-2)	0

Tableau III.1 Nombres de composants nécessaires pour la topologie NPC à n niveaux.

Avec :

- n : le nombre de niveaux de tension obtenus,
- s : le nombre de sources à courant continu,
- k : le nombre de commutateurs principaux,
- D : le nombre de diodes principales,
- Dc : le nombre de diodes clampées,
- C : le nombre de condensateurs d'équilibrage.

L'onduleur de tension à trois niveaux présente des avantages par rapport à la topologie d'onduleur classique (à deux niveaux).

Ces avantages sont : **[31]**

- Réduction des harmoniques : L'onduleur à diode de bouclage génère une tension de sortie à plusieurs niveaux, ce qui permet de réduire les harmoniques présents dans la forme d'onde de tension. Cela conduit à une meilleure qualité de la tension de sortie, réduisant ainsi les perturbations et les interférences.
- Réduction des pertes de commutation : Les diodes de bouclage utilisées dans l'onduleur à diode de bouclage acheminent le courant lorsque les interrupteurs sont éteints. Cela permet de réduire les pertes de commutation, ce qui améliore l'efficacité globale de l'onduleur.
- Tension de clamping du point neutre : L'onduleur à diode de bouclage offre une tension de clamping du point neutre stable et équilibrée. Cela réduit les surtensions potentielles et les risques de court-circuit.
- Meilleure répartition de la tension : Les diodes de bouclage permettent une répartition équilibrée de la tension entre les branches de l'onduleur. Cela réduit les contraintes de tension sur les interrupteurs et contribue à une plus grande fiabilité et durabilité de l'onduleur.

Inconvénients :

- Coût plus élevé : L'ajout de diodes de bouclage supplémentaires augmente le coût de fabrication de l'onduleur à diode de bouclage par rapport à d'autres types d'onduleurs. Cela peut rendre cette technologie moins attractive dans certaines applications où le coût est un facteur déterminant.
- Complexité des diodes de bouclage : La mise en œuvre des diodes de bouclage nécessite une attention particulière lors de la conception et du dimensionnement des composants. Les diodes doivent être correctement sélectionnées pour gérer les courants et les tensions appropriés.
- Contraintes de tension de commutation : Les diodes de bouclage ont une certaine tension de seuil de commutation, ce qui impose des contraintes sur les tensions de commutation dans l'onduleur à diode de bouclage. Cela peut affecter la conception de l'onduleur et nécessiter des ajustements supplémentaires pour garantir un fonctionnement fiable.

Il est important de prendre en compte ces avantages et inconvénients lors du choix d'un onduleur de tension à diode de bouclage. Ils peuvent varier en fonction des exigences spécifiques de l'application et des autres alternatives disponibles sur le marché.

III.5.2 Onduleurs multi-niveaux à condensateur flottant

Les onduleurs multi-niveaux à condensateur flottant, également connus sous le nom d'onduleurs multi-niveaux à condensateur volant ou d'onduleurs à condensateur intercalé, sont une variante des onduleurs multi-niveaux qui utilisent des condensateurs flottants pour générer des tensions de sortie à plusieurs niveaux. [33]

Plusieurs cellules « condensateur et paire d'interrupteurs » sont imbriquées les unes dans les autres comme l'illustre la figure (III.4) pour un bras d'onduleur à condensateur flottant :

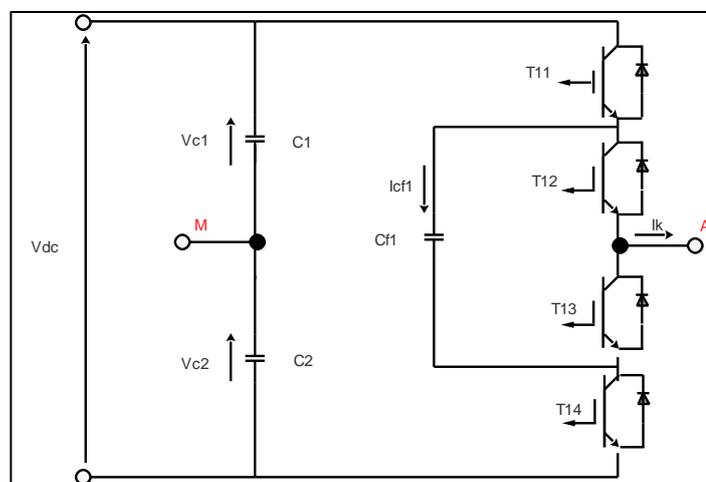


Fig III.3 Circuit d'une phase d'un onduleur à condensateur flottant trois niveaux.

Pour un onduleur à condensateur flottant de N niveaux, chaque bras doit contenir $2(N - 1)$ interrupteurs et $\frac{N*(N-1)}{2}$ capacités, et nous avons $2(N - 1)$ séquences de fonctionnement possible permettant de générer les n niveaux de tensions. Cette topologie élimine quelques inconvénients de la NPC comme l'équilibre des tensions supportées par les interrupteurs [32].

Topologies	N	S	K	D	Dc	C
NPC à Condensateurs flottants	N	(n-1)	2(n-1)	2(n-1)	0	(n-1)(n-2)/2

Tableau III.2 Nombres de composants nécessaires pour la topologie à condensateur flottant à N niveaux

Le principe de fonctionnement de cette topologie est quasiment identique à celui de la topologie NPC.

III.5.3 Onduleur multi niveaux en pont H cascades

Les onduleurs multi-niveaux en cascade, également connus sous le nom d'onduleurs en pont H en cascade, sont une structure relativement nouvelle pour générer une onde de tension alternative (AC). Dans cette configuration, plusieurs onduleurs monophasés sont connectés en série pour former un onduleur multi-niveau.

Chaque onduleur monophasé dans la cascade est alimenté par sa propre source de courant continu (DC). Les sorties de chaque onduleur monophasé sont combinées pour former une onde de tension alternative. [34]

La figure (III.5) montre le schéma de base d'un onduleur à N niveaux en cascade formé par l'association en série de $\frac{(N-1)}{2}$ ponts à deux niveaux. La tension de sortie V_s d'une telle structure est donnée par la somme des $\frac{(N-1)}{2}$ tensions en sortie de ces ponts. Chaque onduleur monophasé en pont est connecté à sa propre source en courant continu. Le nombre de niveaux de tension de sortie dans un onduleur en cascade est définie par :

$N = 2*s + 1$, où s est le nombre des sources des tensions continues [32].

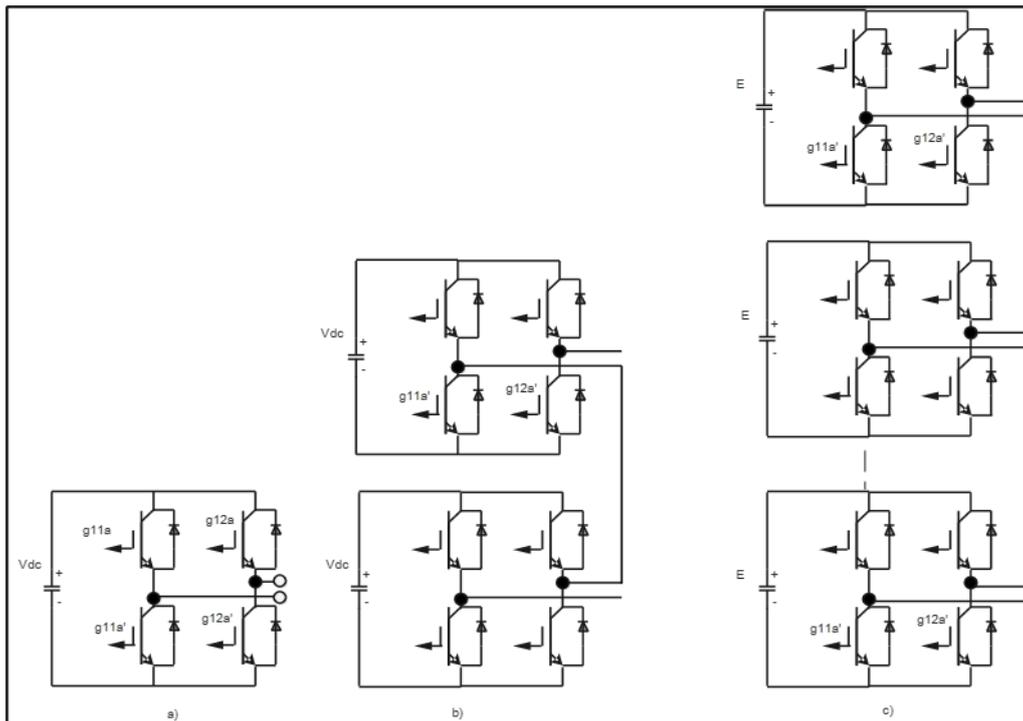


Fig III.4 a) Circuit d'une phase d'un onduleur en pont H cascade à trois niveaux b) à cinq niveaux c) à n niveaux

Topologies	N	S	K	D	Dc	C
Cascade	N	$(n-1)/2$	$2(n-1)$	$2(n-1)$	0	0

Tableau III.3 Nombres de composants nécessaires pour la topologie cascade à n niveaux

III.5.4 Autres topologies

Outre les trois topologies de base discutées précédemment, d'autres topologies de convertisseurs multi niveaux ont été proposées, mais la plupart d'entre elles sont à base de circuits "hybrides", combinaisons de deux topologies de base ou de légères variations de celles-ci. Ces topologies sont [35] :

- a) Le convertisseur asymétrique hybride,
- b) Le convertisseur avec des ponts en cascade et sources CC/CC avec isolement,
- c) Le convertisseur avec commutation douce,
- d) Les convertisseurs reliés par transformateur,
- e) Le convertisseur Diode/Capacitor-Clamped : variante de l'onduleur NPC,
- f) Le convertisseur multi niveaux généralisé.

III.6 Différents stratégies de commande des convertisseurs multiniveaux

Les stratégies de commande des convertisseurs multiniveaux s'inspirent souvent de celles appliquées aux convertisseurs à deux niveaux, mais elles doivent être adaptées pour tenir compte de la structure spécifique des convertisseurs multiniveaux.

En ce qui concerne les méthodes de modulation utilisées dans les onduleurs multiniveaux, elles peuvent être classées en fonction de la fréquence de commutation, à savoir la modulation de largeur d'impulsion (MLI) à basse fréquence et la modulation de fréquence (MF) à haute fréquence.

La méthode la plus couramment utilisée dans les applications industrielles est la MLI à porteuse sinusoïdale (SPWM), qui utilise une technique de décalage de phase pour réduire les harmoniques de la tension de sortie.

III.6.1 Commande par Modulation de Largeur d'Impulsions

La commande par MLI consiste à découper la tension de sortie générée par le convertisseur en une série de motifs élémentaires de période très faible, et de rapport cyclique variable dans le temps. L'évolution temporelle du rapport cyclique de chaque interrupteur est alors déterminée par un signal modulant que l'on choisit en général sinusoïdal. Les ordres de commande de chaque cellule sont générés par l'intersection entre une porteuse triangulaire et le signal modulant. Selon la stratégie adoptée, ce dernier peut être échantillonné en synchronisme avec la porteuse triangulaire, ou comparé directement à celle-ci. Chaque interrupteur commute à une fréquence imposée par celle de la porteuse. Cette méthode de commande permet [34] :

- de repousser vers des fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie ;
- de faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie.

Cette méthode peut être composée à trois types :

III.6.1.1 Modulation sinusoïdale classique

Comme pour les onduleurs à deux niveaux, les signaux de commande des interrupteurs sont obtenus à partir des intersections des trois signaux de référence sinusoïdaux déphasés entre eux de 120° , de fréquence f_{ref} et d'amplitude A_{ref} , avec un signal triangulaire d'amplitude A_p et de fréquence f_p , très supérieure à f_{ref} .

III.6.1.2 Modulation sinusoïdal triangles multiples

Cette technique est basée, dans son principe, sur la modulation sinusoïdale classique. Pour un onduleur à trois niveaux, elle recommande l'utilisation de deux signaux triangulaires de même fréquence f_p et de même amplitude A_p . Ces signaux triangulaires sont comparés,

pour chaque phase, avec un signal de référence d'amplitude A_{ref} et de fréquence f_{ref} . C'est la modulation sinusoïdale à double triangle.

Pour les onduleurs avec un nombre de niveaux N supérieur à trois, la technique sinusoïdale classique avec son signal triangulaire unique, ne permet pas la génération de tous les signaux de commande requis. Alors, c'est la modulation sinusoïdale à triangles multiples qui le permet. Cette technique nécessite $(N - 1)$ signaux triangulaires de même fréquence f_p et de même amplitude A_p .

Le taux de modulation d'amplitude m_a et le rapport de fréquence ou bien le taux de modulation de fréquence m_f sont donnés respectivement par les expressions suivantes :

$$m_a = \frac{A_{ref}}{(N-1)A_p} \dots\dots\dots(III.1)$$

$$m_f = \frac{f_p}{f_{ref}} \dots\dots\dots(III.2)$$

III.6.1.3 Modulation sinusoïdale modifiée

La modulation sinusoïdale modifiée (MSM) est une technique de modulation utilisée dans les onduleurs pour générer une onde sinusoïdale de sortie de tension. Contrairement à la modulation de largeur d'impulsion (MLI) classique, la MSM vise à améliorer la qualité de la forme d'onde de sortie en ajustant les largeurs d'impulsion de manière à suivre plus étroitement la forme d'onde sinusoïdale de référence.

Dans la MLI sinusoïdale modifiée, les impulsions sont générées en utilisant une onde sinusoïdale de référence. Les largeurs des impulsions sont augmentées aux points où l'amplitude de l'onde sinusoïdale est maximale et diminuées aux points où l'amplitude est minimale. Ainsi, les impulsions sont concentrées dans les parties de l'onde sinusoïdale où la valeur absolue est plus élevée.

La principale caractéristique de la MLI sinusoïdale modifiée est l'application de l'onde sinusoïdale pendant les premiers et les derniers 60 degrés de chaque demi-cycle. Cela signifie que les impulsions sont générées seulement dans les intervalles de 60 à 120 degrés et de 180 à 240 degrés (pour une onde sinusoïdale à 360 degrés). [34]

III.6.2 Modulation vectorielle

La modulation vectorielle est une technique de modulation utilisée dans les onduleurs pour générer une tension de sortie de référence à partir des états de commutation de l'onduleur. Contrairement à la modulation de largeur d'impulsion (MLI), où les impulsions sont générées en fonction de la tension de référence, la modulation vectorielle calcule analytiquement les vecteurs à appliquer et les temps d'application de ces vecteurs pour obtenir la tension de référence souhaitée.

Dans la modulation vectorielle, chaque état possible du convertisseur est représenté par un vecteur de tension. L'ensemble de ces vecteurs forme le diagramme vectoriel des tensions du convertisseur. En sélectionnant les vecteurs appropriés et en les appliquant dans

l'ordre correct, il est possible d'obtenir une fréquence de commutation élevée à la sortie avec une fréquence de commutation réduite au niveau des composants.

La modulation vectorielle diffère des techniques de modulation intersectives, telles que la MLI, car elle tient compte simultanément de l'état des trois bras de l'onduleur pour élaborer les signaux de commande. Cela permet d'optimiser la génération des vecteurs de tension et d'améliorer la qualité de la tension de sortie. [34]

III.6.3 Elimination d'Harmoniques sélective

Cette technique de modulation, qui est une méthode très efficace et très importante pour la commande des onduleurs à deux niveaux afin d'améliorer beaucoup plus la qualité de leurs tensions de sortie. Elle consiste à former l'onde de sortie de l'onduleur d'une succession de créneaux de largeurs variables. Généralement, on utilise une onde qui présente une double symétrie par rapport au quart et à la demi-période. [34]

III.7 Modélisation de l'onduleur à trois niveaux de type NPC

III.7.1 Structure de l'onduleur à trois niveaux

La structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC (Neutral-Point Clamped) utilise trois bras de commutation et est conçue pour générer une tension alternative triphasée à partir d'une source de tension continue. Voici une description plus détaillée de la structure de cet onduleur :

- Chaque bras de commutation est composé de deux interrupteurs de puissance, généralement des transistors MOSFET ou des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Ces interrupteurs sont contrôlés de manière à permettre la commutation de la tension de sortie.

- Au centre de chaque bras de commutation se trouve un point neutre (ou point milieu), noté "0". Ce point neutre est relié à une alimentation continue, appelée force électromotrice (E).

- Les condensateurs de filtrage C_1 et C_2 , de même capacité, sont utilisés pour former un diviseur de tension capacitif. Ces condensateurs permettent de créer deux sources secondaires de tension continue, chacune fournissant une demi-tension ($E/2$)

- Les condensateurs C_1 et C_2 , sont connectés entre eux en un point neutre "o". Il est important que ces condensateurs soient identiques pour éviter tout déséquilibre de charge entre les deux côtés ($C_1 = C_2$, ce qui signifie que $U_{c1} = U_{c2}$, où U_{c1} et U_{c2} sont les tensions aux bornes des condensateurs respectifs).

- Le point neutre "0". est également connecté aux deux diodes médianes (DDK1, DDK2). Ces diodes permettent de fournir un chemin pour le courant dans les configurations de commutation spécifiques de l'onduleur.

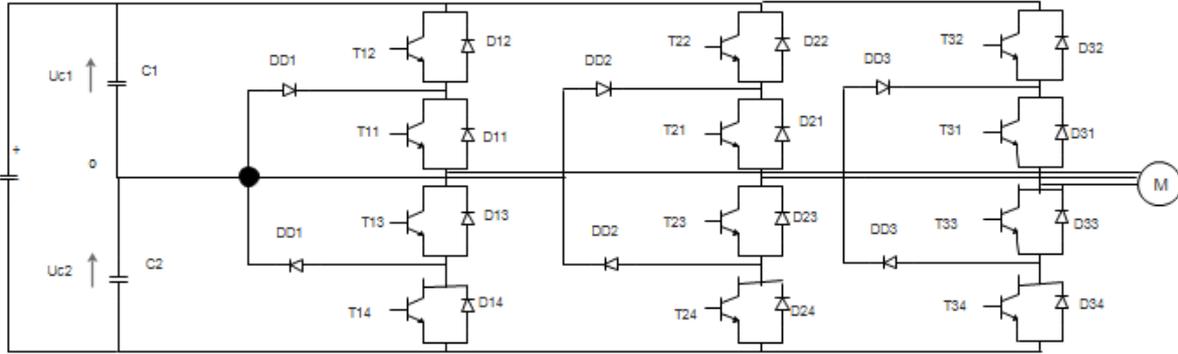


Fig III.5 Onduleur triphasé à trois niveaux

Pour simplifier la complexité de la structure de l'onduleur à trois niveaux, on présente chaque paire (Transistor -diode) par un seul interrupteur bidirectionnel TDKS (Figure III.6), et vue la symétrie de la structure, on présente la configuration d'un seul bras (Figure III.7)

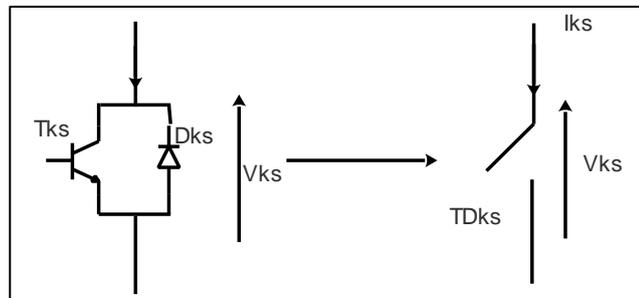


Fig III.6 Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire Transistor – diode

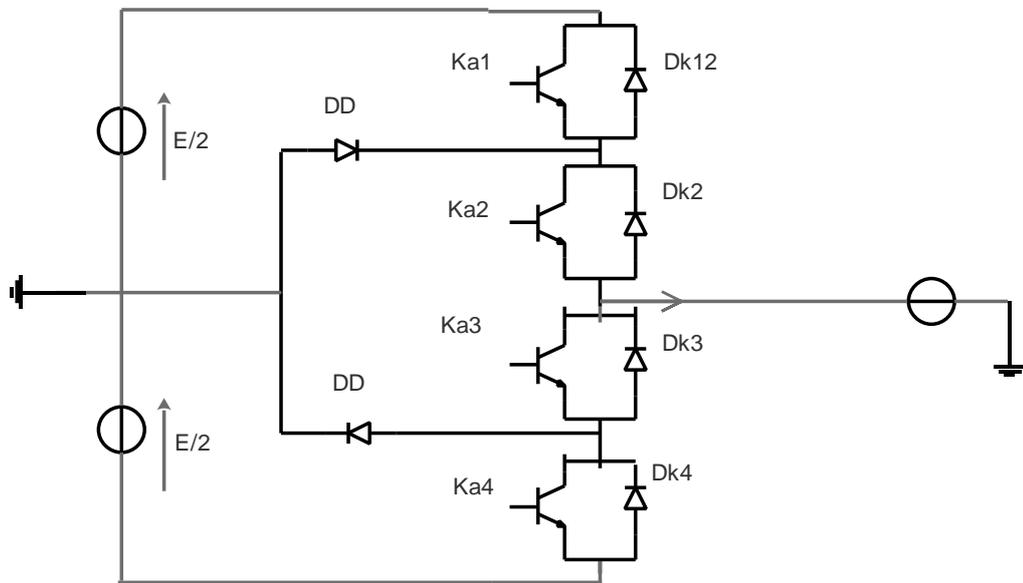


Fig III.7 Un bras de l'onduleur à trois niveaux de type NPC.

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs dans un onduleur à trois niveaux dépendent de plusieurs facteurs, notamment : [36]

- Commande externe BKS : La commande externe BKS (Blocage ou Amorçage du semi-conducteur Bidirectionnel TKS) permet de contrôler l'amorçage ou le blocage des interrupteurs de puissance bidirectionnels. Cette commande externe est généralement fournie par un système de contrôle externe de l'onduleur.

- Commande interne basée sur les courants du bras : La commande interne des interrupteurs est définie en fonction des courants mesurés dans les bras de l'onduleur. Ces courants sont utilisés pour contrôler l'ouverture et la fermeture des interrupteurs afin de maintenir un fonctionnement sûr et efficace de l'onduleur.

- Commande complémentaire pour éviter les courts-circuits : Pour éviter la mise en conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un seul bras, ce qui pourrait entraîner un court-circuit aux bornes des sources continues et endommager les composants, une solution couramment utilisée consiste à mettre en place une commande complémentaire. Cela signifie que les interrupteurs d'un même bras sont commandés de manière complémentaire, c'est-à-dire que lorsque l'un des interrupteurs est fermé, l'autre est ouvert et vice versa. Cette technique permet d'éviter les conditions de court-circuit et de garantir un fonctionnement sûr de l'onduleur.

III.7.2 Configurations et fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux

Dans un onduleur NPC à trois niveaux, la tension simple V_{ao} entre la borne (a) de la charge et le point neutre O peut prendre différentes valeurs en fonction de l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs K_{a1}, K_{a2}, K_{a3} et K_{a4} du bras.

Sur les $2^4 = 16$ configurations possibles, seules trois configurations sont mises en œuvre. Toutes les autres séquences ne sont pas fonctionnelles et sont donc à éviter. En effet, elles provoquent soit des courts-circuits des sources de tension continue, soit elles provoquent la déconnexion de la charge.

L'onduleur à trois niveaux étant symétrique, l'étude peut se limiter au fonctionnement d'un seul bras, (où on distingue trois configurations possibles). On donne ci-dessous le tableau récapitulatif (tableau III.4) représente la tension de sortie V_{ao} d'un onduleur NPC à trois niveaux en fonction de l'état des interrupteurs, la tension aux bornes des interrupteurs de puissance n'excède jamais la moitié du bus d'entrée.

Il est important de noter que la tension aux bornes des interrupteurs de puissance ne dépasse jamais la moitié de la tension d'entrée (E). Cette particularité distingue l'onduleur à trois niveaux de l'onduleur à deux niveaux. De plus, chaque demi-bras de l'onduleur à trois niveaux utilise deux interrupteurs unidirectionnels, ce qui permet d'effectuer une commande décalée pour obtenir les différentes tensions de sortie.

➤ Première configuration

K_{a1}, K_{a2} sont passants et K_{a3}, K_{a4} sont bloqués (Figure III.8) la valeur de tension simple V_{ao} est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = \frac{+E}{2} \dots \dots \dots (III.3)$$

La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{k_{a3}} = V_{k_{a4}} = \frac{+E}{2} \dots \dots \dots (III.4)$$

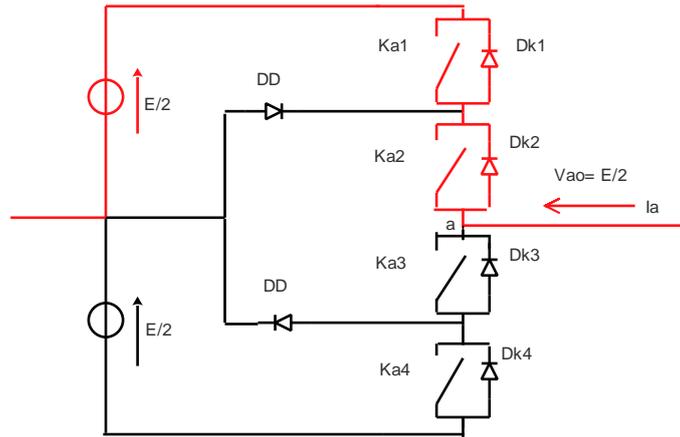


Fig III.8 1ere configuration du 1^{er} bras

➤ Deuxième configuration

K_{a2}, K_{a3} sont passants et K_{a1}, K_{a4} sont (Figure III.9), le point a est relié directement au point neutre 0. La tension simple V_{ao} est nulle :

$$V_{ao} = 0 \dots \dots \dots (III.5)$$

La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{k_{a1}} = V_{k_{a4}} = \frac{+E}{2} \dots \dots \dots (III.6)$$

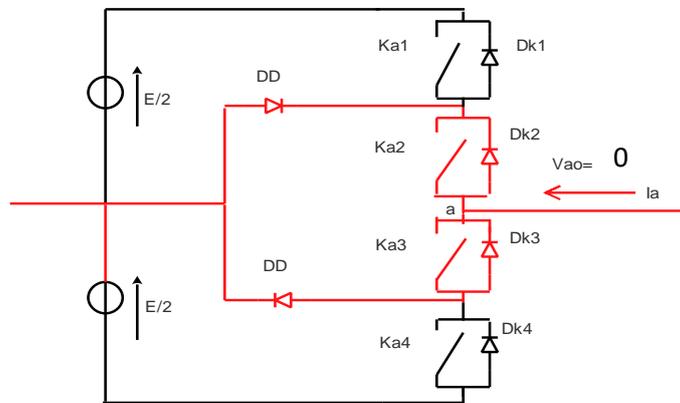


Fig III.9 2eme configuration du 1^{er} bras

➤ Troisième configuration

K_{a3}, K_{a4} sont passants et K_{a1}, K_{a2} sont bloqués (Figure III.10) la valeur de tension simple V_{ao} est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = \frac{-E}{2} \dots \dots \dots (III.7)$$

La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = \frac{+E}{2} \dots \dots \dots (III.8)$$

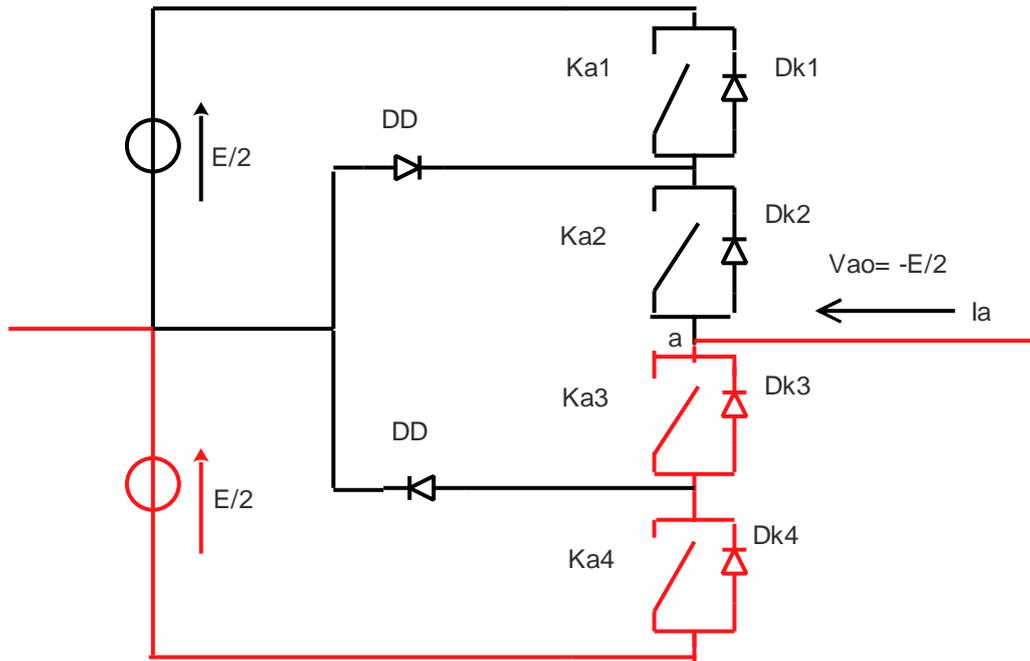


Fig III.10 3eme configuration du 1^{er} bras

Etat des interrupteurs				Tension de sortie V_{ao}
Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	
1	1	0	0	$\frac{E}{2}$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-\frac{E}{2}$

Tableau III. 4 Table de commutation du convertisseur NPC 3 niveaux

Pour visualiser l'enchainement des configurations décrites ci-dessus, la (figure III.11) représente les signaux de commande de chaque interrupteur, ainsi que la forme d'onde de la tension de sortie V_{ao} .

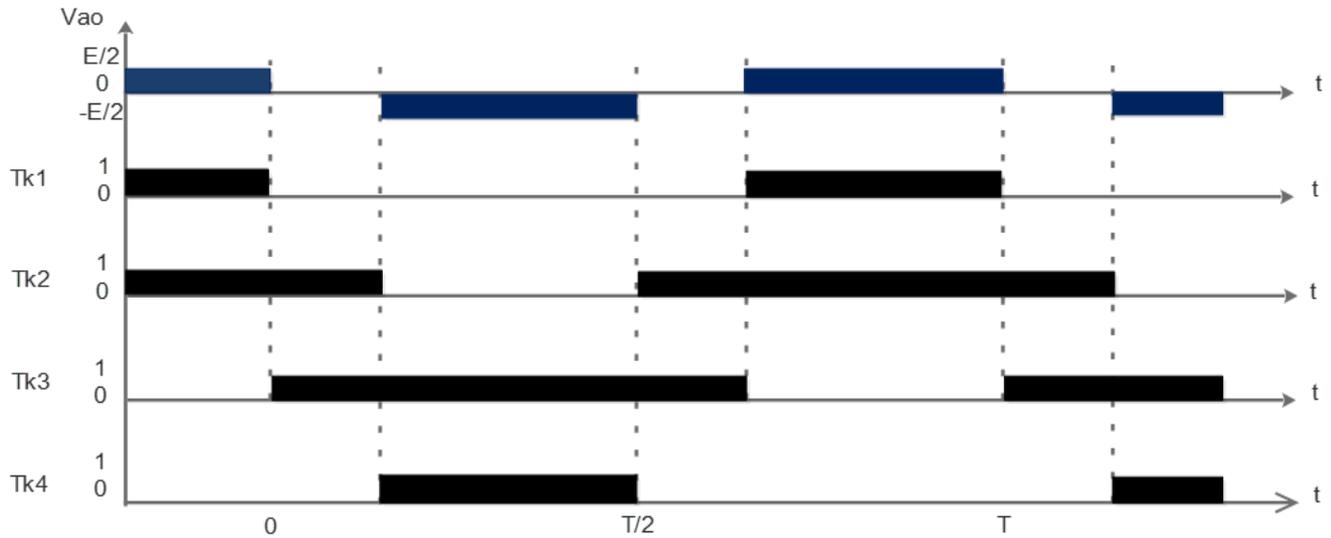


Fig III. 11 Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à trois niveaux de type NPC

III.8 Commande complémentaire

Pour éviter le court-circuit des sources de tension par conduction de plusieurs interrupteurs, et pour que le convertisseur soit totalement commandable, on adopte une commande complémentaire.

Pour un bras K de l'onduleur triphasé à trois niveaux, et en mode commandable, on définit les trois commandes complémentaires comme suit :

$$BK1 = \overline{BK2} \quad BK1 = \overline{BK3} \quad BK1 = \overline{BK4}$$

$$BK3 = \overline{BK4} \quad BK2 = \overline{BK4} \quad BK2 = \overline{BK3}$$

a) Commande N° 1

Soit la commande complémentaire suivante : $BK1 = \overline{BK2}$

$$BK3 = \overline{BK4}$$

BKS: Commande du transistor TKS du bras K.

Tableau III. 5 La table logique correspondante à cette commande est définie comme suit :

B_{k1}	B_{k2}	B_{k3}	B_{k4}	Tension de sortie du bras K (V_{ao})
<i>Off</i>	<i>On</i>	<i>Off</i>	<i>On</i>	<i>Inconnue</i> (dépend de la charge)
<i>Off</i>	<i>On</i>	<i>On</i>	<i>Off</i>	$V=0$ ou $I=0$ (<i>Inconnue</i>)
<i>On</i>	<i>Off</i>	<i>Off</i>	<i>On</i>	$V=0$ ou $I=0$ (<i>Inconnue</i>)
<i>On</i>	<i>Off</i>	<i>On</i>	<i>Off</i>	$V=0$

Cette commande rend le système pratiquement incommandable

b) **Commande N°2**

Soit la commande complémentaire suivante : $BK1 = B\bar{K}3$

$$BK2 = B\bar{K}4$$

Tableau III. 6 La table logique correspondante à cette commande est définie comme suit :

B_{k1}	B_{k2}	B_{k3}	B_{k4}	V_{ao}
<i>Off</i>	<i>Off</i>	<i>On</i>	<i>On</i>	$-U_{c2} = \frac{-E}{2}$
<i>Off</i>	<i>On</i>	<i>On</i>	<i>Off</i>	(<i>Inconnue</i>)
<i>On</i>	<i>Off</i>	<i>Off</i>	<i>On</i>	(<i>Inconnue</i>)
<i>On</i>	<i>On</i>	<i>Off</i>	<i>Off</i>	$U_{c1} = \frac{E}{2}$

La commande dans ce cas n'est possible qu'à deux niveaux

c) **Commande N°3**

Soit la commande complémentaire suivante : $BK1 = B\bar{K}4$

$$BK2 = B\bar{K}3$$

Tableau III. 7 La table logique correspondante à cette commande est définie comme suit :

B_{k1}	B_{k2}	B_{k3}	B_{k4}	V_{ao}
<i>Off</i>	<i>Off</i>	<i>On</i>	<i>On</i>	$-U_{c2} = \frac{E}{2}$
<i>Off</i>	<i>On</i>	<i>Off</i>	<i>On</i>	(Inconnue)
<i>On</i>	<i>Off</i>	<i>On</i>	<i>Off</i>	$V = 0$
<i>On</i>	<i>On</i>	<i>Off</i>	<i>Off</i>	$U_{c1} = \frac{E}{2}$

Cette commande complémentaire rend le système totalement commandable à trois niveaux. La commande N°3 est la seule qui permet d'exploiter les trois niveaux de tension de sortie possible pour un bras ($U_{c1}, 0, -U_{c2}$), avec $U_{c1} = U_{c2} = \frac{E}{2}$. C'est cette commande qui va être adoptée pour la modélisation de l'onduleur à trois niveaux.

III.9. Modèle mathématique :

Le modèle mathématique d'un onduleur NPC (Neutral-Point Clamped) est généralement décrit par les équations de Kirchhoff pour chaque branche du circuit.

Voici les équations générales pour modéliser un onduleur NPC :

1. Pour chaque bras de commutation (demi-pont) de l'onduleur NPC, les équations de tension sont les suivantes :

- Pour le bras supérieur : $V_{ao} - V_{an} = L \frac{di_{ao}}{dt} + \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{di_{ac}}{dt} + \frac{di_{ab}}{dt}\right) \dots\dots\dots(III.9)$

- Pour le bras inférieur : $V_{ao} - V_{bn} = L \frac{di_{ao}}{dt} + \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{di_{ab}}{dt} + \frac{di_{bc}}{dt}\right) \dots\dots\dots(III.10)$

- Pour le bras médian : $V_{ao} - V_{cn} = L \frac{di_{ao}}{dt} + \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{di_{ac}}{dt} + \frac{di_{bc}}{dt}\right) \dots\dots\dots(III.11)$

Où :

V_{ao} : est la tension de sortie entre la borne (a) de la charge et le point neutre O.

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} : sont les tensions entre les bornes (a), (b), (c) respectivement et le point neutre O.

L : est l'inductance du bras de commutation.

$\frac{di}{dt}$: représente la dérivée temporelle du courant dans chaque branche.

2. Les équations de continuité du courant dans chaque bras de commutation sont les suivantes :

- Pour le bras supérieur : $\frac{di_{ab}}{dt} + \frac{di_{ac}}{dt} = 0 \dots \dots \dots (III.12)$

- Pour le bras inférieur : $\frac{di_{ab}}{dt} + \frac{di_{bc}}{dt} = 0 \dots \dots \dots (III.13)$

- Pour le bras médian : $\frac{di_{ac}}{dt} + \frac{di_{bc}}{dt} = 0 \dots \dots \dots (III.14)$

Ces équations garantissent la conservation du courant dans chaque bras de commutation pour deux raisons principales :

- Conservation de la charge : Les équations de continuité du courant indiquent que la somme des variations de courant dans chaque bras de commutation est nulle. Cela signifie que la charge électrique qui entre dans un bras de commutation doit être égale à la charge électrique qui en sort. Ainsi, la conservation de la charge est respectée dans le système.

- Loi de Kirchhoff des courants : Les équations de continuité du courant sont basées sur la loi de Kirchhoff des courants, qui stipule que la somme des courants entrants dans un nœud est égale à la somme des courants sortants du nœud. En appliquant cette loi aux nœuds de connexion des bras de commutation, on obtient les équations de continuité du courant, qui assurent que la somme des variations de courant dans chaque bras est égale à zéro.

En respectant ces équations de continuité, on garantit que le courant est correctement acheminé à travers chaque bras de commutation de l'onduleur NPC à trois niveaux, évitant ainsi toute interruption de courant ou accumulation de charge indésirable. Cela contribue à assurer un fonctionnement stable et efficace de l'onduleur.

3. Les équations de tension entre les bornes des interrupteurs sont les suivantes :

- Pour l'interrupteur supérieur : $V_{ab} = V_{dc} - V_{ao} \dots \dots \dots (III.15)$

- Pour l'interrupteur inférieur : $V_{bc} = V_{dc} - V_{ao} \dots \dots \dots (III.16)$

Où : V_{ab} et V_{bc} sont les tensions entre les bornes des interrupteurs,

V_{dc} est la tension continue d'entrée de l'onduleur.

Ces équations permettent de modéliser le comportement de l'onduleur NPC et de décrire les relations entre les tensions et les courants dans le circuit.

III.10 La commande de l'onduleur

III.10.1 Commande en puissance

Cette partie présente le développement du contrôle de l'étage CC-CA de l'onduleur PV pour régler la tension à injecter, laquelle comporte :

- Une boucle à verrouillage de phase (PLL Phase Locked Loop) pour la synchronisation avec la tension du réseau.
- Une boucle de réglage de la tension du bus continu laquelle impose la référence du courant à injecter au réseau.
- Une boucle de poursuite de courant réseau désiré.

Le schéma synoptique de connexion au réseau électrique se présente dans la figure III.12.

La sortie de l'onduleur est connectée au réseau électrique, échantillonnant la tension du réseau (e_a, e_b et e_c) et la phase de verrouillage. Les courants i_a, i_b et i_c à la sortie de l'onduleur sont échantillonnés et comparés avec ses références. Les écarts entre elles passent par le régulateur PI, les sorties de régulateur donnent les composantes de la tension de référence de la MLI dans le repère (d_q). En passant par la transformée inverse de Park, nous obtenons les références du signal de commande (MLI).

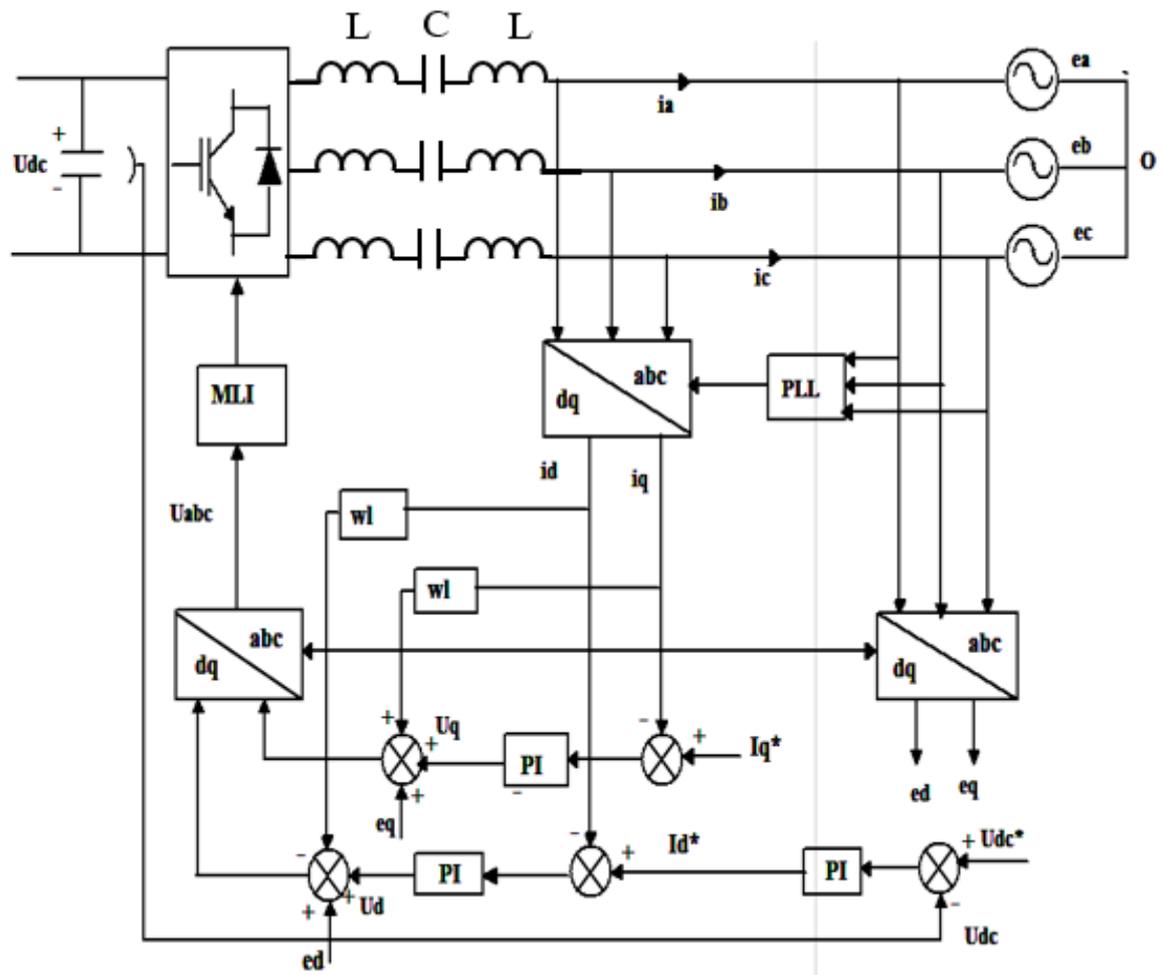


Fig III.12 Schéma synoptique de commande de la connexion au réseau

e_d et e_q : sont les composantes directe et quadratique de la tension du réseau dans le référentiel de Park.

i_d et i_q : sont les composantes directe et quadratique du courant à la sortie d'onduleur dans le référentiel de Park.

U'_d et U'_q : sont les composantes directe et quadratique de la tension à la sortie du régulateur PI dans le référentiel de Park.

Une PLL, ou boucle à phase asservie, ou encore boucle à verrouillage de phase, est un montage électronique permettant d'asservir la phase instantanée de sortie sur la phase instantanée d'entrée, mais elle permet aussi d'asservir une fréquence de sortie sur un multiple de la fréquence d'entrée.

Le principe de base de la PLL triphasée consiste à appliquer une transformation inverse de Park sur les tensions triphasées du réseau. La composante d'axe q générée par cette transformation est asservie à zéro par action sur l'angle du repère de Park afin de générer l'angle de synchronisation.

Le dispositif de commande des courants (i_d et i_q) a été obtenu à partir de l'inversion du modèle de la liaison au réseau dans le repère de Park.

La figure III.13 présente un schéma sous forme de bloc des lois de commande obtenues par inversion du modèle de filtre dans le repère de Park.

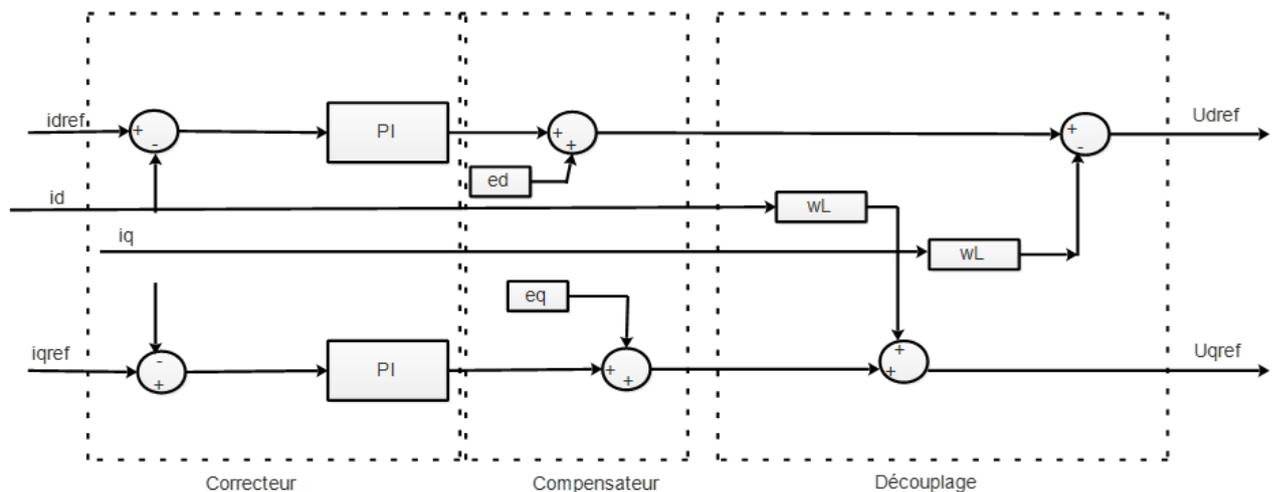


Fig III.13 Schéma bloc du contrôle des courants transités par le réseau dans le repère de Park

III.11 Conclusion

En résumé, dans ce chapitre on a posé les bases nécessaires en présentant les types d'onduleurs multi-niveaux, en se concentrant sur la structure à NPC, et en introduisant la modélisation de l'onduleur à trois niveaux de type NPC, son modèle mathématique ainsi que les stratégies de commande par MLI. Ces éléments nous permettront d'approfondir notre étude dans le chapitre suivant sur le système de générateur photovoltaïque raccordé au réseau.

IV.1 Introduction

Un système photovoltaïque raccordé au réseau sera en interaction avec le réseau électrique. Le principal avantage de ce système est que le pouvoir peut être tiré du réseau électrique et lorsque l'alimentation n'est pas disponible à partir du réseau, le système PV peut compléter ce pouvoir.

Dans ce chapitre nous allons parler de la connexion au réseau, ainsi que les résultats qu'on a eu lors de la simulation avec un onduleur deux niveaux puis avec un onduleur NPC trois niveaux.

IV.2 Connexion au réseau [37]

Dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau, l'un des objectifs que doit réaliser l'onduleur connecté au réseau, est le contrôle du courant issu du champ des modules photovoltaïques et de la puissance injectée au réseau suivant les normes en vigueur. De ce fait, les spécifications standards servant à la conception d'un onduleur connecté, concerneront la puissance nominale, la tension nominale du réseau, la tension maximale du DC-bus, le contrôle de l'onduleur etc.

Généralement, dans un système photovoltaïque connecté au réseau électrique, c'est le courant que l'onduleur injecte au réseau qui doit être réellement contrôlé. Celui-ci sera la variable à réalimenter dans l'onduleur quand il est planifié de fermer la boucle de régulation.

Le rendement de l'onduleur dépend pour une grande partie de la stratégie de commande utilisée. Cependant le contrôle de courant est un des sujets les plus importants dans les applications des onduleurs du fait des avantages qu'il présente et qui sont :

- Un contrôle du courant instantané et une grande précision
- Une protection maximale du courant
- Une très bonne dynamique
- Une compensation de la chute de tension des semi-conducteurs et du temps mort du convertisseur
- Une compensation de la tension du bus continu et des variations de la tension de sortie.

IV.3 Description générale du système [15]

Le système développé dans le cadre de notre travail est une centrale photovoltaïque qui est connectée au réseau électrique via un système de conversion DC/DC. L'objectif de ce système est de maximiser la puissance du générateur photovoltaïque en suivant le point de puissance maximale (MPPT) afin d'optimiser la production d'énergie.

Le système de conversion DC/DC est utilisé pour réguler et adapter la tension et le courant du générateur photovoltaïque afin de les aligner avec les exigences de l'onduleur

triphase trois niveaux. Ce système de conversion assure une conversion efficace de l'énergie solaire et permet d'exploiter au maximum le potentiel du générateur photovoltaïque.

Le bus continu, représentant la tension du côté courant continu, est connecté au réseau électrique par l'intermédiaire de l'onduleur triphasé trois niveaux. L'onduleur triphasé trois niveaux est responsable de convertir l'énergie continue du générateur photovoltaïque en une forme d'énergie alternative synchronisée avec le réseau électrique triphasé. Les trois niveaux de l'onduleur permettent de générer une onde sinusoïdale de haute qualité et de réduire les harmoniques indésirables.

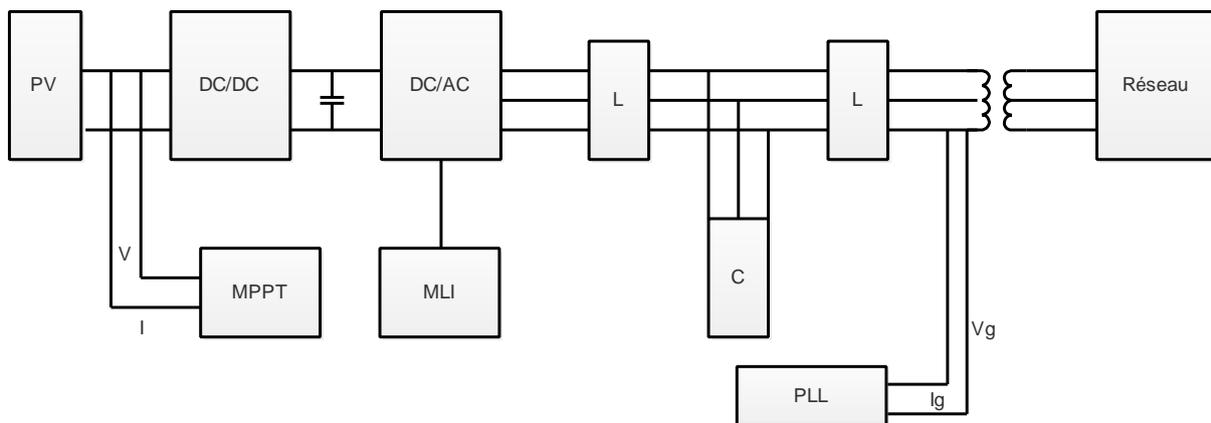


Fig IV.1 Schéma global du système

Concernant le panneau PV

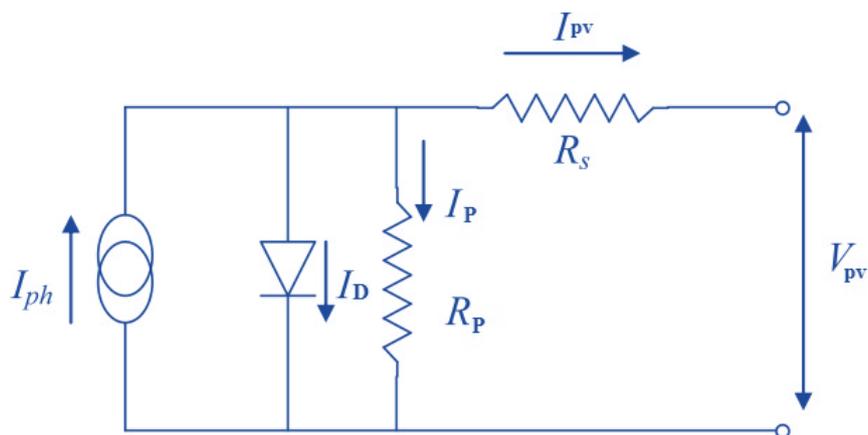


Fig IV.2 Schéma équivalent d'une cellule PV modèle a une diode.

• **Ses équations**

➤ Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D - I_P \dots \dots \dots (IV.1)$$

➤ Le courant produit par la photopile est donné par :

$$I_{ph} = P_1 * E_S (1 + P_2(E_S - E_{sref}) + P_3(T_J - T_{jref})) \dots\dots\dots(IV.2)$$

➤ Le courant de la diode est donné par :

$$I_D = I_{od} * \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_S * I_{PV})}{k * A * N_S * T_J} \right) - 1 \right] \dots\dots\dots(IV.3)$$

Où : $I_{od} = P_4 * T_j^3 * \exp \left[\frac{E_g}{k * T_j} \right] \dots\dots\dots(IV.4)$

➤ Le courant de la résistance shunt est donné par :

$$I_p = \frac{V_{pv}}{R_p} \dots\dots\dots(IV.5)$$

➤ L'équation globale modélisant le générateur photovoltaïque est la suivante

$$I_{PV} = P_1 * E_S \left(1 + P_2(E_S - E_{sref}) + P_3(T_J - T_{jref}) \right) - P_4 * T_j^3 * \exp \left[\frac{E_g}{k * T_j} \right] * \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_S * I_{PV})}{k * A * N_S * T_J} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_p} \dots\dots\dots(IV.1)$$

Paramètres	Valeurs
Puissance max du panneau P_m	110 W
Puissance nominale P_n	110 W
Courant au point de puissance max I_m	3.15 A
Tension au point de puissance max V_m	35 V
Courant de court-circuit I_{cc}	3.45A
Tension en circuit ouvert V_{cc}	43.5 V
Coefficient d'incrémentatation du courant $I_{cc}(\alpha_{cc})$	1,4 mA/°C
Coefficient d'incrémentatation de la tension $V_{oc}(\beta_{oc})$	- 152 mV/°C

Tableau IV.1 Paramètres électriques des panneaux SIEMENS

IV.4 Résultats de simulation

Afin de faire une comparaison entre l'onduleur deux niveaux et celui de trois niveaux NPC, nous avons effectué une simulation sur l'espace Matlab Power System durant **1(s)**.

- Les paramètres de simulation sont comme t'elles :

La valeur de la fréquence de commutation	10 Hz
--	-------

Tableau IV.2 La valeur de la fréquence de commutation

Tension primaire V_p	Tension secondaire V_s	Fréquence f
33 <i>kV</i>	380 <i>V</i>	50 <i>Hz</i>

Tableau IV.3 Paramètres électriques du transformateur

Inductance L	Capacité C	Resistance R
8,84 <i>mH</i>	22 μF	0,016 Ω

Tableau IV.4 Paramètres électriques des filtres

Le réseau	
Tension du réseau V_R	Fréquence f
33 <i>kV</i>	50 <i>Hz</i>

Tableau IV.5 Paramètres électriques du réseau

C_1	C_2
6600 μF	6600 μF

Tableau IV.6 Capacités de l'onduleur 3 niveaux NPC

Interprétations et comparaisons des résultats

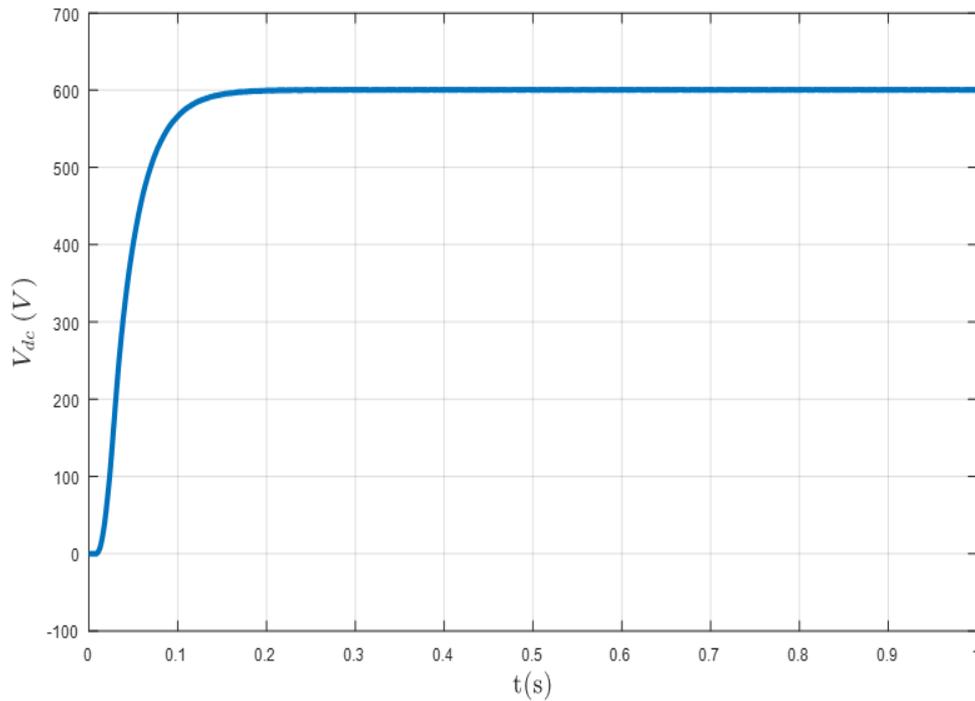


Fig IV.3 Tension de bus continu onduleur deux niveaux

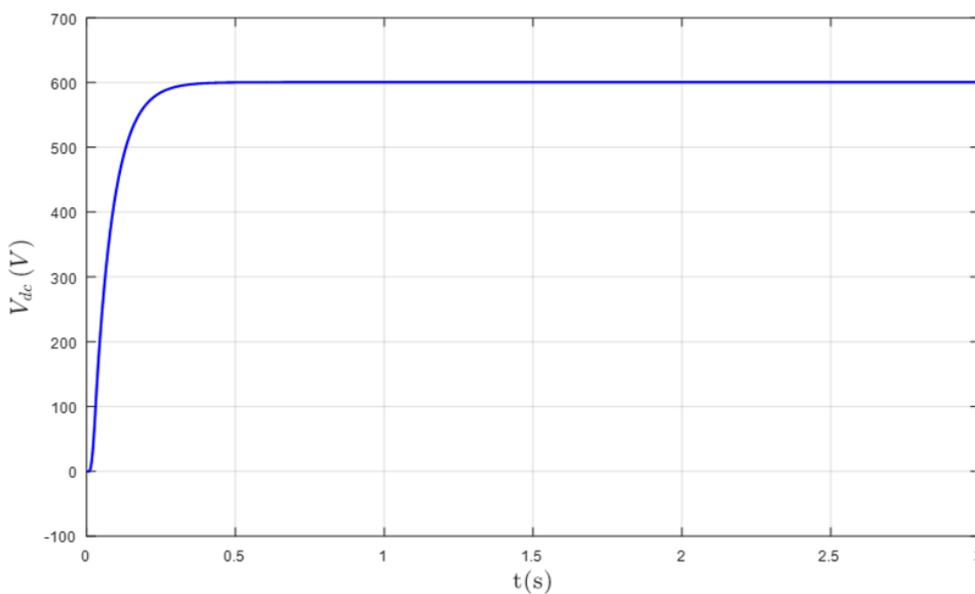


Fig IV.4 Tension de bus continu onduleur trois niveaux NPC

Pour la tension de bus continu, que ça soit pour l'onduleur deux niveaux ou pour l'onduleur trois niveaux, cette dernière devient stable et constante après avoir atteint la valeur de 600V.

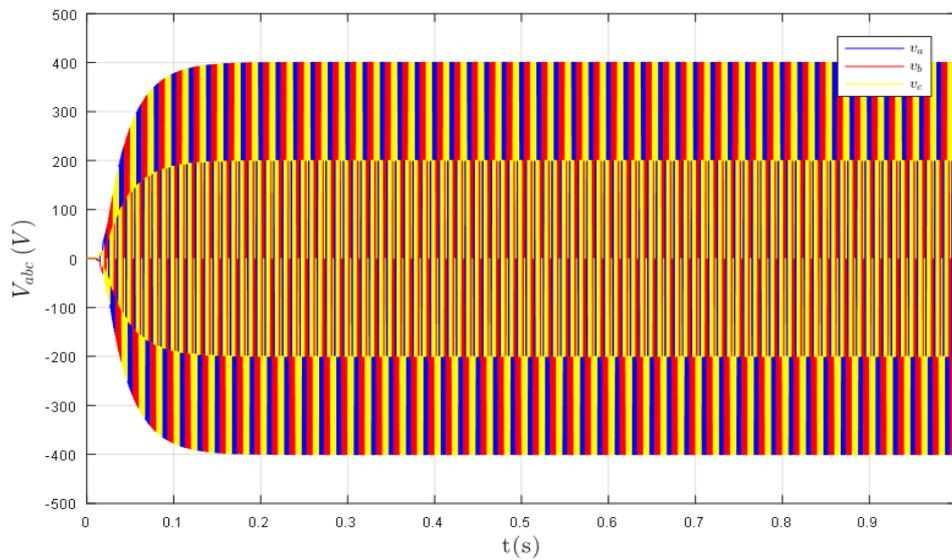


Fig IV.5 Tension entre phase de l'onduleur deux niveaux

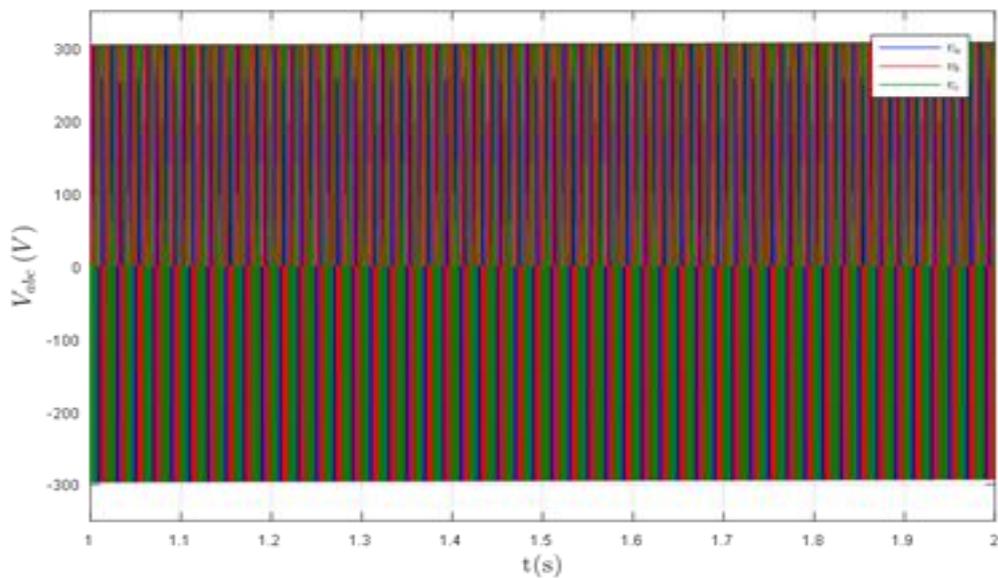


Fig IV.6 Tension entre phase de l'onduleur trois niveaux NPC

Pour la tension entre phase de l'onduleur à deux niveaux, on constate que cette dernière a une forme d'onde carrée ou quasi rectangulaire avec des niveaux de tension positifs et négatifs. Et cela a entraîné des harmoniques et des distorsions dans les formes d'ondes. Alors que la tension entre phase de l'onduleur trois niveaux NPC est modulée de manière plus complexe, elle offre une forme d'onde plus proche d'une sinusoïde pure.

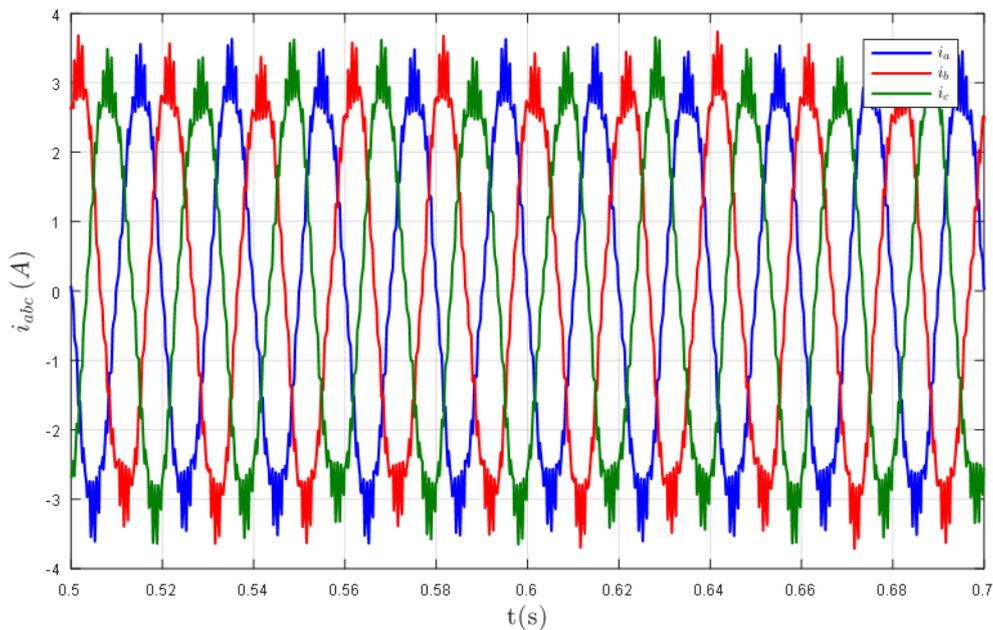


Fig IV. 7 Allure des courants avant filtrage (avec l'onduleur deux niveaux)

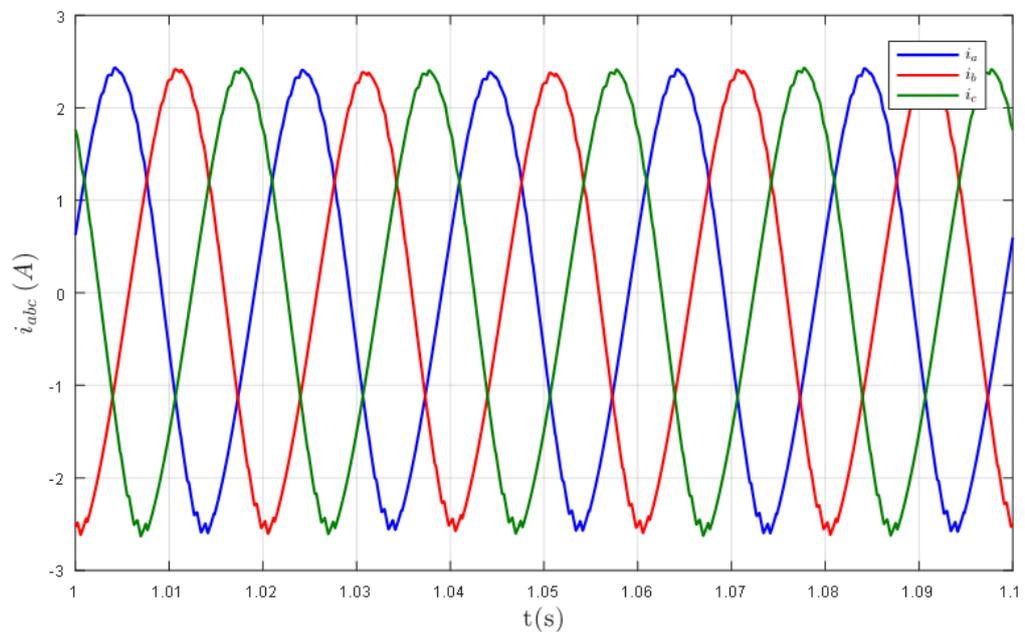


Fig IV. 8 Allure des courants avant filtrage (avec l'onduleur trois niveaux NPC)

Pour l'allure des courants avant le filtrage ; le courant généré par l'onduleur deux niveaux a des formes d'ondes pas très sinusoïdales en raison de la modulation de largeur d'impulsion (PWM) utilisée, et il contient des harmoniques et des distorsions, ce qui a un impact sur la qualité de l'énergie. Concernant le courant généré par l'onduleur trois niveaux, ses formes d'ondes se rapproche énormément de de la sinusoïdale et on distingue peu d'harmoniques.

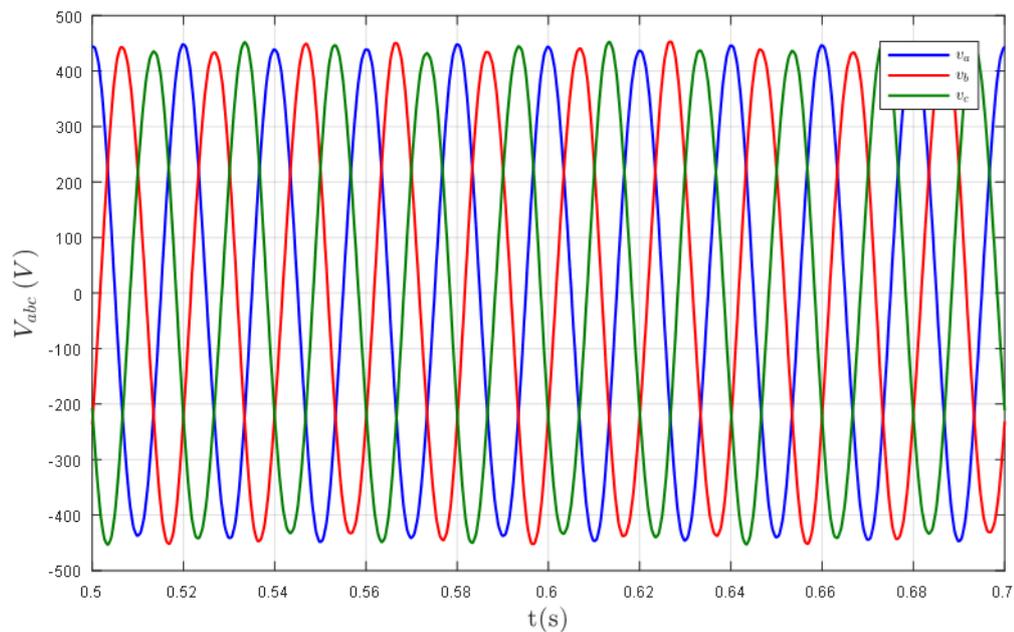


Fig IV.9 Allure des tensions simple après filtrage (onduleur deux niveaux)

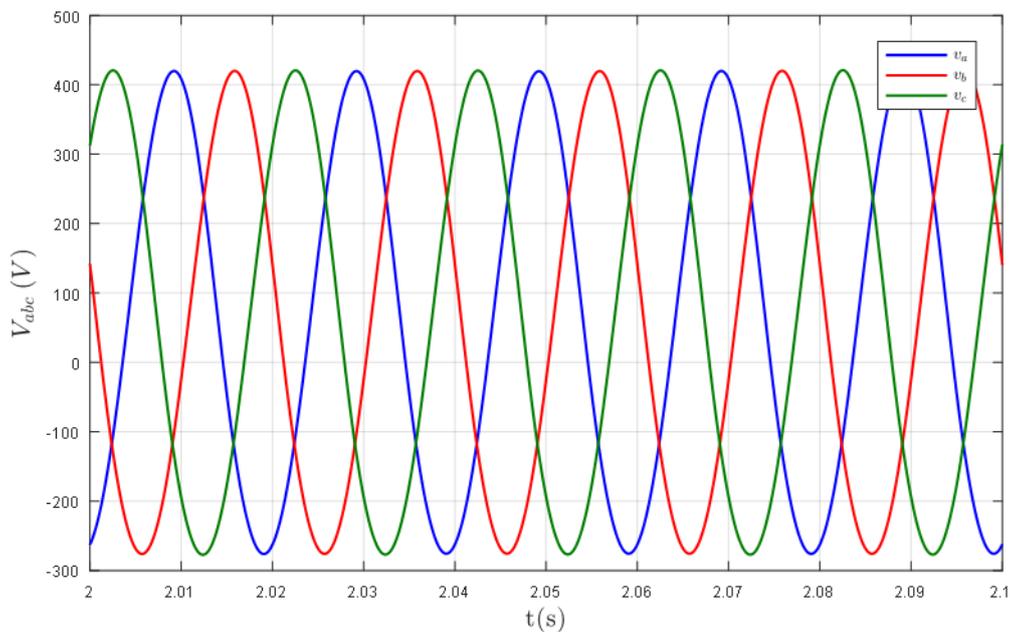


Fig IV.10 Allure des tensions simple après filtrage (onduleur trois niveaux NPC)

Une fois que les tensions générées par les onduleurs ont été filtrées, on remarque qu'elles ont une allure sinusoïdale plus proche de la forme idéale. Le filtrage a permis de réduire les harmoniques et les distorsions, conduisant à des tensions plus stables et de meilleure qualité. Les tensions après filtrage des deux types d'onduleurs sont plus sinusoïdales, bien que l'onduleur trois niveaux NPC puisse présenter une meilleure qualité de tension en raison de sa modulation plus avancée.

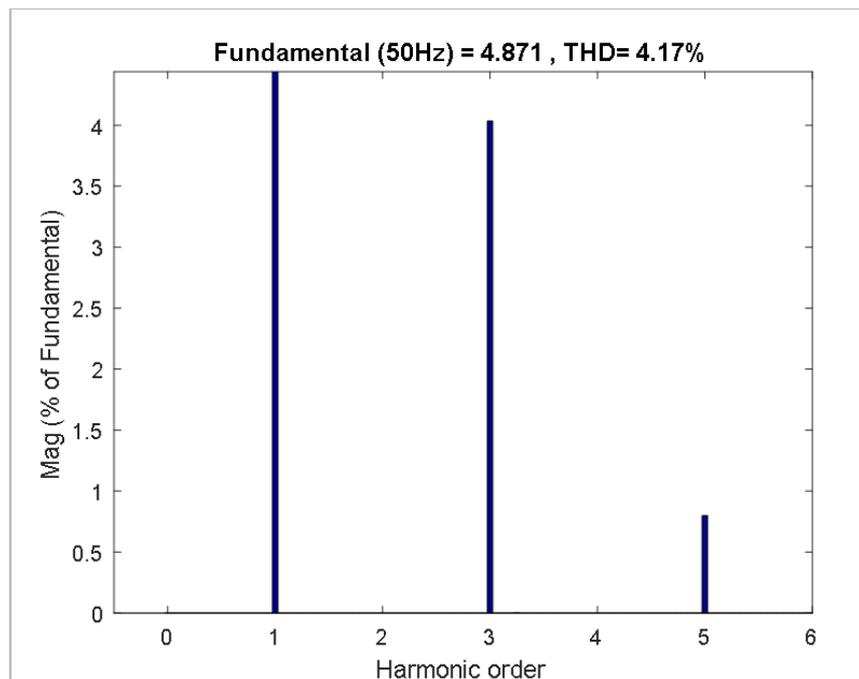


Fig IV.11 Allure du THD du courant à la sortie de l'onduleur deux niveaux

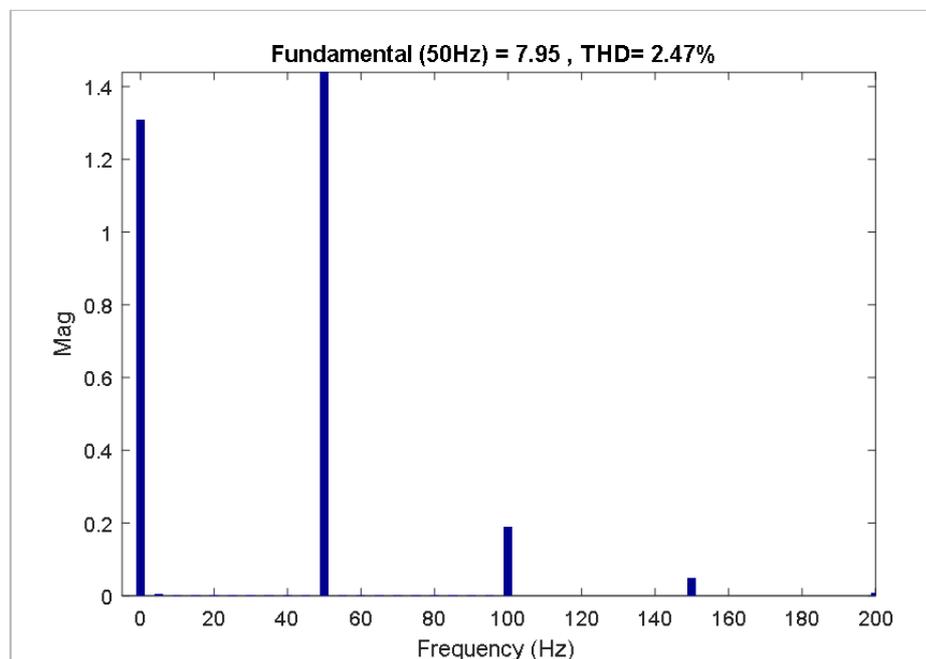


Fig IV.12 Allure du THD du courant à la sortie de l'onduleur deux niveaux

L'allure du THD du courant à la sortie de l'onduleur deux niveaux présente un pourcentage de : 4,17 %, ce qui fait que son THD est élevé, cela indique la présence d'harmoniques indésirables et de distorsions dans le courant de sortie de l'onduleur. L'onduleur trois niveaux NPC présente un THD d'une valeur de : 2,47%, qui est moins élevé (environs la moitié de la valeur du premier THD).

Types	Deux niveaux	Trois niveaux NPC
<i>THD (%)</i>	4,17	2,47

Tableau IV.6 Facteurs de distorsion de chaque type d'onduleur

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit le système utilisé dans notre étude, nous avons extrait les résultats de la simulation effectuée ; avec l'onduleur deux niveaux puis avec l'onduleur trois niveaux NPC et fait leurs interprétations et comparaisons.

En comparaison, l'onduleur trois niveaux NPC offre une meilleure qualité de tension et de courant par rapport à l'onduleur deux niveaux, donc celui-ci est plus performant. En optant pour l'onduleur trois niveaux NPC, on a pu bénéficier d'une meilleure qualité d'énergie, avec moins d'harmoniques et de distorsions dans la tension de sortie.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude et la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique à l'aide d'un onduleur multiniveaux. Il met en évidence l'émergence des convertisseurs de puissance multiniveaux et leur intégration croissante dans les réseaux d'énergie. Ces convertisseurs jouent un rôle d'interface entre le champ photovoltaïque et le réseau électrique, permettant de générer une tension aussi sinusoïdale que possible et d'améliorer le taux d'harmoniques grâce à leur structure à plusieurs niveaux de tension.

L'objectif principal de ce travail était d'obtenir une meilleure qualité d'énergie. Dans la première partie, des notions générales sur les systèmes photovoltaïques ont été présentées, notamment le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et le générateur photovoltaïque. La deuxième partie a porté sur l'étude du convertisseur DC-DC utilisé dans les systèmes photovoltaïques, ainsi que sur les méthodes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) en général, avec un accent particulier sur la méthode de perturbation et observation. Les convertisseurs AC-DC ont également été abordés.

La troisième partie a été consacrée à une recherche bibliographique sur les topologies des onduleurs multiniveaux utilisées dans les systèmes photovoltaïques, en se concentrant sur l'onduleur multiniveau NPC. Enfin, la dernière partie a abordé le réseau électrique, décrivant le système global étudié, et a réalisé une comparaison entre les résultats obtenus avec l'onduleur deux niveaux et ceux avec l'onduleur trois niveaux NPC. Les deux scénarios ont été réalisés dans des conditions identiques, en utilisant la même source et les mêmes charges de générateur photovoltaïque. Une analyse qualitative a été réalisée pour déterminer quel onduleur était le plus performant, et les résultats ont montré que le convertisseur NPC présente de meilleures performances par rapport à l'autre type d'onduleur.

En résumé, ce travail de mémoire a permis d'étudier et de simuler un système photovoltaïque connecté au réseau électrique en utilisant un onduleur multiniveau. L'objectif d'obtenir une meilleure qualité d'énergie a été atteint, et les résultats ont montré les avantages du convertisseur NPC par rapport à l'autre type d'onduleur :

- Amélioration de la qualité de l'énergie : L'utilisation d'un onduleur multi-niveaux NPC permet de générer une tension plus sinusoïdale avec moins d'harmoniques et de distorsions. Cela contribue à l'amélioration de la qualité d'énergie injectée dans le réseau électrique, réduisant ainsi les problèmes de perturbations et d'interférences.
- Augmentation de l'efficacité énergétique : Les onduleurs multi-niveaux NPC offrent un rendement énergétique élevé grâce à leur capacité à réduire les pertes d'énergie lors de la conversion de la puissance photovoltaïque en énergie électrique utilisable.
- Intégration facilitée au réseau électrique : L'onduleur multi-niveaux NPC offre une interface efficace entre le champ photovoltaïque et le réseau électrique. Il permet de réguler la tension et la fréquence de sortie du système PV pour qu'elles correspondent aux spécifications du réseau électrique.

- Fiabilité et robustesse : L'onduleur multi-niveaux NPC sont réputés pour sa fiabilité et leur durabilité. conçu pour fonctionner de manière optimale dans des conditions environnementales et opérationnelles variées, assurant ainsi une exploitation efficace et durable du système PV.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : Cours master 1 spécialité énergie renouvelables, ‘Systèmes de conversion de l’énergie Photovoltaïque, chapitre 3’, Mme REKIOUA née ZIANI D.
- [2] : H.Aboub, ‘‘Commande d’un onduleur neuf niveaux, destiné aux fortes puissances PV’’, Mémoire de magister en électrotechnique option : maîtrise des énergies, Université EL-OUED, 2019.
- [3] : A. Labouret-Michel Villosz, "Energie solaire photovoltaïque", édition Dunod, Paris, 2006.
- [4] : Ministère de l’énergie et des mines, « Guide des énergies renouvelables », Edition(2007)
- [5] :S.Gustav, énergie renouvelable, Ndangane, 2007.
- [6] :P.Cummel, Braun.J-P, Labouret.A, ‘Cellules solaires’, éditionDunod, Paris 2001.
- [7] :K. TABET « Etude, Modélisation et optimisation des systèmes Photovoltaïques » Mémoire de Magister (2011).
- [8] : Cours master 2 spécialité énergie renouvelables, ‘Intégration des énergies renouvelables au réseau, chapitre2’,K.Rahrah.
- [9] : BernardEquer« E. solairephotovoltaïque », volume 1, publié par Ellipses éditions marketing et l’UNISCO 1993.
- [10] :B.Mohammed, « Modélisation d’un système de captage photovoltaïque autonome », Mémoire de Magister, Centre universitaire de Bechar, 2008.
- [11] : R. Issad. « Etude de contrôle direct du couple de la machine asynchrone alimentée par un générateur photovoltaïque ». Mémoire de Magister, Université de Bejaïa, 2007-2008
- [12] :<http://www.photovoltaique.guidenr.fr>
- [13] : <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16696>
- [14] : A. M. BOUDEN « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque » ; Mémoire de magister en électronique option : instrumentation ; UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, 2008.
- [15] : A. BOUSSEKINE, N. GUERMOUCHE « Contribution à l’étude des systèmes de pompage photovoltaïque » Mémoire d’ingénieur électromécanique ; UNIVERSITEABDERAHMANE MIRA.BEJAIA,2010.
- [16] : M. LOPEZ, <<Contribution à l’optimisation d’un système de conversion éolienne pour une unité de production isolée >>, thèse de doctorat université PARIS SUD11, 2008.
- [17] : S. FERDJANI,O. MAATALLAH, ‘Etude et Réalisation d’un Hacheur Boost Commandé par le μ C ARDUINO en vue d’Implémenter des Commandes MPPT’,mémoire de master en électrotechnique option : Commande Electrique, Université Ahmed Draia Adrar, 2019.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [18] : W.BENSACI, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master, Université de Ouargla, 2012.
- [19] : Kharef Fatima Zohra, « Commande MPPT pour les panneaux photovoltaïques en ombrage », MASTER Université Ahmed Draïa-Adrar 2020-2021
- [20] : B.Bennai, H. Benameur, « Commande d'un onduleur multi niveaux pour l'injection de puissance photovoltaïque au réseau électrique », Master en : électromécanique, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2018.
- [21] : G.Benterki, A.Mekidech, « Commande MPPT appliquée à un système PV connecté à un réseau électrique triphasé », master en électronique option: Electronique des Systèmes Embarqués, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2022.
- [22] : Ch. Ghabara , H. Jouini , M. Mahbib , A. Mami , « Stratégie d'optimisation floue du point d'extraction de la puissance maximale (MPPT) pour les petites éoliennes connectées à des sites isolés » , Université de Tunis El Manar, Faculté des sciences de Tunis, Campus Universitaire 2092 - El Manar Tunis, Tunisie.
- [23] : N Aouchiche M S Ait Cheikh A. Malek, Revue des énergies renouvelable, « Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation » Le 30/09/2013.
- [24] : A. BOUKAROURA, « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche BondGraph », Magister en électrotechnique Option : Réseaux Électriques, Université Ferhat Abbas de Setif, 2009.
- [25] : S. Bouda, A. Berkane, « Génération et implémentation sur FPGA de signaux PWM pour la commande des onduleurs multi-niveaux », Mémoire master en électronique spécialité instrumentation, Université Saad Dahlab de Blida, 2019/2020.
- [26] : Hidri Imed, « Les convertisseurs DC-DC et DC-AC », Institut supérieurs des études technologiques de Nabeul, PDF.
- [27] : K. SAIDOUN, M. SI Moussi, « Commande MLI d'un onduleur multi-niveau », mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouazou, 2015
- [28] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_multiniveau#:~:text=Un%20convertisseur%20multiniveau%20%E2%80%94%20ou%20convertisseur,tension%20de%20sortie%20des%20convertisseurs.&text=%2C%20formant%20ainsi%20%20niveaux.
- [29] : Bendaikha Abdelmalik , « Commande par MLI vectorielle d'un onduleur multi-niveaux », thèse doctorat, Université Badji Mokhtar-annaba.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [30] : A. Ammiche, « Commande des onduleurs multi niveaux de tension a diodes flottantes », Mémoire de master, Université de M'sila, 2013.
- [31] : K.Bouchareb, Etude de différentes topologies des onduleurs multi niveaux (Cascade et NPC), Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2020.
- [32] : JIANG, Xueyang. Étude comparative de structures de convertisseurs pour les systèmes photovoltaïques connectés à un réseau électrique moyenne tension, Thèse de doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, 2019.
- [33] : DEKKICHE, Mohamed Lotfi. Etude d'un onduleur multiniveau en cascade de type 3/2, Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El-Bouaghi, 2018.
- [34] : BOUCHERITTE.W, Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau, Mémoire de Magistère, Université de Biskra, 2013.
- [35] : ABDALLAH, MANSOURI, Commande des Onduleurs Multiniveaux, Thèse de doctorat. Université de Mohamed Boudiaf Faculté de Technologie, M'SILA, 2016.
- [36] : M.S GUERBOUZ, I. SALAHI, « Etude, Modélisation et commande d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC », mémoire master, Université Ahmed Draya d'ADRAR, 2021
- [37] : L. Hassaine , « Onduleurs photovoltaïques connectés au réseau électrique »

Résumé

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à l'étude et la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique. A nos jours, on vit la naissance de nouveaux convertisseurs de puissance dit multiniveaux. La recherche dans le domaine en électronique de puissance et le domaine énergétique s'intéresse de plus en plus à ces nouveaux convertisseurs de puissance et à les intégrer dans les réseaux de transport d'énergie qui jouent le rôle d'interface entre le champ photovoltaïque et le réseau électrique et qui permettent de générer une tension la plus sinusoïdale que possible et d'améliorer le taux d'harmoniques grâce au nombre élevé des niveaux de tension offert par la structure de ces convertisseurs. Le travail effectué dans ce mémoire avait comme objectif de faire le raccordement d'un système photovoltaïque au réseau électrique par le biais d'un onduleur multiniveaux qui est l'onduleur trois niveaux NPC.

Mots clés : Photovoltaïque ; réseau électrique ; multiniveaux ; structure NPC (neutral point clamping) ; sinusoïdale ; harmoniques.

Abstract

Abstract:

The work presented in this dissertation involves the study and simulation of a photovoltaic system connected to electrical grids. Nowadays, we are witnessing the emergence of new multi-level power converters. Research in the field of power electronics and the energy sector is increasingly focused on these new power converters and their integration into energy transmission networks, which act as an interface between the photovoltaic field and the electrical grid. These converters aim to generate the most sinusoidal voltage possible and improve harmonic distortion by offering a high number of voltage levels through their structure. The objective of this dissertation was to connect a photovoltaic system to the electrical grid using a multi-level inverter, specifically the three-level NPC (Neutral Point Clamped) inverter.

Keywords: Photovoltaic; electrical grid; multi-level; NPC structure (Neutral Point Clamping); sinusoidal; harmonics.



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA
Faculté De Technologie
Département de Génie Électrique
Spécialité : Électrotechnique

En vue de l'obtention du diplôme master en électrotechnique
Options : Energies renouvelables en électrotechnique.
Réseaux électriques.

Thème

**Connexion d'un système photovoltaïque
au réseau électrique par le biais d'un
onduleur multi-niveaux au sein de Cevital.**

Réalisé par :

- ❖ M^{elle} YAKOUBI Líticia
- ❖ M^{elle} ZIDANI Kamelia

Encadré par :

Mr. B. AMROUCHE
Mlle. S. NACEF

Promotion 2022/2023

