



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES  
DÉPARTEMENT de GÉNIE ÉLECTRIQUE



**Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de  
Master**

**Spécialité** : Génie Electrique

**Option** : Informatique industrielle

**Présenté par :**

MAHIOUSSI Fouzia

MATALLAH Nebia

*Sujet du mémoire*

***Apport des convertisseurs multi niveaux dans  
la production décentralisée.***

*Soutenu publiquement devant le jury composé de :*

Mr, Y. MESLEM

Mr, S. BELFEDHAL

Mr,A. BERKANI

Président

Rapporteur

Examineur

**PROMOTION : 2015**

# Remerciement

*Tout d'abord, tout louange à **ALLAH** qui nous a éclairé le chemin du savoir et notre grand salut sur le premier éducateur notre prophète **Mohamed**. (que le salut soit sur lui)*

*Nous remercions à **Allah** le tout puissant*

*Nous tenons à exprimer nos remerciements très chaleureusement mon encadreur **Mr Belfedhal Seif Din** qui m'a assisté à réaliser ce travail effectif.*

*Nous tenons également à remercier **Mr Meslem.Y** Maître de conférences d'avoir accepté la présidence du jury et **Mr Berkani**. Maître de conférences d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Nous adressons nos vifs remerciements et nos sincères gratitude à tous nos enseignants du Département du Génie Electrique, pour leur aide précieuse, leurs orientations et leurs conseils.*

*Nous remercions chaleureusement le directeur du laboratoire **Mr. T. ALLAoui** qui nous a soutenues par ces directives et son professionnalisme dans le domaine*

*Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont aidé de près ou de loin à la rédaction de ce travail.*

# Dédicace

## *Je dédie ce modeste travail*

*A mes adorables parents qui m'ont soutenus dans les moments les plus difficiles, partagés mes joies et mes peines, qui se sont toujours sacrifiés à mes dépends.*

*A mon frère Abdelaziz et leur épouse et mes sœurs et leurs époux*

*À toute la famille MATALLAH ET BELHAKEM*

*A tous ceux qui ont contribué à mon éducation et instruction depuis ma naissance à ce jour, ainsi, je présente mes profonds respects à mes professeurs qui m'ont assisté, orientés, conseillés vers l'objectif de la réussite dont j'ai toujours souhaité, ceci par leurs connaissances pédagogiques et professionnelles au service de toutes les étudiantes et étudiants.*

# Dédicace

## *Je dédie ce modeste travail*

*A mes adorables parents qui m'ont soutenu dans les moments les plus difficiles, partagés mes joies et mes peines, qui se sont toujours sacrifiés à mes dépends.*

*A mon frère KHALED et mes sœurs*

*À toute la famille MAHIOUSSI , BOUTHELDJA et HALLOUZ*

*A tous ceux qui ont contribué à mon éducation et instruction depuis ma naissance à ce jour, ainsi, je présente mes profonds respects à mes professeurs qui m'ont assisté, orientés, conseillés vers l'objectif de la réussite dont j'ai toujours souhaité, ceci par leurs connaissances pédagogiques et professionnelles au service de toutes les étudiantes et étudiants*

*Liste des symboles*

$\Delta U_1, \Delta U$	Pas du convertisseur
$\Delta U_k$	Pas de la cellule $k$
$\Delta u_k$	Pas de la cellule $k$ rapporté à l'amplitude de l'onduleur
$(\Delta U_k, nk)$	couple caractérisant la cellule $k$
$E$	Energie
$M$	nombre de cellule composant le convertisseur
$N$	nombre de niveaux du convertisseur
$n1..k$	nombre de niveaux d'un onduleur composé de $k$ cellules
$T_e$	période d'échantillonnage
$T_m$	période de modulation
$U_{ref}$	signal de référence
$u_s$	tension de sortie du convertisseur
$U_{e,k}$	tension d'alimentation de la cellule $k$
$E$	Tension principale de l'onduleur NPC.
$F_{bK0}$	Fonction de connexion du demi bras en bas.
$F_{bK1}$	Fonction de connexion du demi bras en haut.
$I_s$	Le courant à la sortie de l'onduleur.
$K_{is}$	Commutateur de l'onduleur NPC.
$K_i$	Interrupteur bidirectionnel en courant.
$M(t)$	Matrice de conversion composée.
$N(t)$	Matrice de conversion simple.*
$T$	La période de modulation.
$R_p$	Résistances parallèle ( $\Omega$ ).
$R_s$	Résistance série ( $\Omega$ ).
$I$	Le courant généré par la cellule (A).

<b><math>I_d</math></b>	Le courant de la diode (A).
<b><math>I_{PV}</math></b>	Le photo-courant généré par la cellule (A).
<b><math>I_0</math></b>	Le courant de saturation inverse de la diode (A).
<b>V</b>	La potentielle thermodynamique (V).
<b>q</b>	La charge de l'électron ( $1,60217646 \times 10^{-19} \text{C}$ ).
<b>A</b>	Le facteur de non idéalité de la jonction P-N ( <b><math>1 \leq A \leq 3</math></b> ).
<b>K</b>	La constante de Boltzmann ( $1,3806503 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ).
<b>T</b>	La température réelle de la jonction (K).
<b>N<sub>s</sub></b>	Le nombre de cellules connectées en série.
<b>N<sub>p</sub></b>	Le nombre de cellules connectées en parallèle.
<b><math>I_{PV,n}</math></b>	Le photo-courant généré dans les conditions nominales (A).
<b>T<sub>n</sub></b>	La température de la jonction dans les conditions nominales (K).
<b>G</b>	L'ensoleillement réel ( $\text{w/m}^2$ ).
<b>G<sub>n</sub></b>	L'ensoleillement nominal ( $\text{w/m}^2$ ).
<b><math>I_{SO,n}</math></b>	Courant de saturation en circuit ouvert dans les conditions nominales (A).
<b><math>V_{OC,n}</math></b>	La tension en circuit ouvert dans les conditions nominales (V).
<b>K<sub>n</sub></b>	Coefficient de voltage thermique (V/k).
<b>V<sub>OC</sub></b>	La tension du circuit ouvert.
<b>I<sub>mpp</sub></b>	La valeur de courant du MPP.
<b>V<sub>mpp</sub></b>	La valeur de tension du MPP.
<b>I<sub>SC</sub></b>	Le courant de court-circuit.
<b><math>\Delta V</math></b>	La chute de tension.
<b>R, X</b>	La résistance et la réactance totale de la ligne.
<b>P<sub>MAX</sub></b>	La puissance maximale.
<b>T<sub>e</sub></b>	La période de commutation.

**$\alpha$**  Le rapport cyclique

### *Abréviations utilisées*

**PV** Photovoltaïque.

**CNE** Consommation nationale d'électricité

**Cd Te** Cadmium Telluride.

**GPV** Générateur Photovoltaïque.

**MPPT** The maximum power point tracker.

**MPP** Point maximal de puissance ("maximum power point").

**DC** Courant Continu (Direct Current).

**AC** Courant Alternatif (Alternative Current).

**GRD** Gestionnaire de réseau de distribution.

**MT** Moyenne tension.

**BT** Basse tension.

**MLI** Modulation Largeur d'Impulsion.

**PWM** Pulse Width Modulation.

**P&O** Perturbation et Observation.

**CV** Constant Voltage.

**IC** L'Incrémentation de la Conductance.

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I : *Les principales topologies des convertisseurs multi niveaux*

<b>Figure I. 1:</b> Schéma d'une branche d'onduleur NPC à 3 niveaux : (a) sans résistance d'équilibrage (b) avec résistance d'équilibrage.....	05
<b>Figure I. 2:</b> Schéma d'une branche d'onduleur multiniveau à cellules imbriquées.....	09
<b>Figure I. 3:</b> Schéma d'une branche d'onduleur SMC 5 niveaux à 2 cellules 2 étages.....	14
<b>Figure I. 4:</b> Schéma d'une branche d'onduleur multiniveau cascadié.....	16
<b>Figure I. 5:</b> schéma de l'amplificateur quasi-linéaire proposé par Müller .....	17
<b>Figure I. 6:</b> Schéma de la structure asymétrique proposée par K.A. Corzine. X. Kou propose d'utiliser $U_e$ , $2 = 4U_e$ , $1$ .....	21

## Chapitre II : *Modélisation et simulation des onduleurs multi niveaux à commande pleine onde et à commande (MLI).*

<b>Figure II. 1:</b> Modèle de l'onduleur à deux niveaux.....	23
<b>Figure II. 2:</b> Onduleur triphasé à trois niveaux.....	24
<b>Figure II. 3:</b> Un bras de l'onduleur à trois niveaux de type NPC.....	25
<b>Figure II.4:</b> 1er configuration du 1er bras .....	26
<b>Figure II. 5:</b> 2ème configuration du 1er bras.....	27
<b>Figure II. 6:</b> 3ème configuration du 1er bras.....	28
<b>Figure II. 7:</b> Modèle de connaissance de l'onduleur triphasé à trois niveaux.....	33
<b>Figure II. 8:</b> Bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux.....	34
<b>Figure II. 9:</b> 1ère configuration du 1er bras.....	35
<b>Figure II. 10:</b> 2ème configuration du 1er bras.....	36
<b>Figure II. 11:</b> 3ème configuration du 1er bras.....	36
<b>Figure II. 12:</b> 4ème configuration du 1er bras.....	37
<b>Figure II. 13:</b> 5ème configuration du 1er bras.....	38
<b>Figure II. 14:</b> Bras d'un onduleur NPC à sept niveaux .....	39
<b>Figure II. 15:</b> 1ère configuration du 1er bras.....	40
<b>Figure II. 16:</b> 2ème configuration du 1er bras.....	41
<b>Figure II. 17:</b> 3ème configuration du 1er bras.....	42
<b>Figure II. 18:</b> 4ème configuration du 1er bras.....	43

<b>Figure II. 19:</b> 5ème configuration du 1er bras .....	44
<b>Figure II. 20:</b> 6ème configuration du 1er bras .....	45
<b>Figure II. 21:</b> 7ème configuration du 1er bras .....	46
<b>Figure II. 22:</b> Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulo-sinusoidale à une porteuse .....	47
<b>Figure II. 23:</b> La tension $V_p$ et $V_{\text{réf}}$ avec $m=12$ et $r=0.8$ .....	48
<b>Figure II. 24:</b> La tension simple $V_{ao}$ onduleur deux niveaux par MLI sinus triangulaire.....	48
<b>Figure II. 25:</b> La tension composée $V_{ac}$ onduleur deux niveaux par MLI sinus triangulaire.....	48
<b>Figure II. 26:</b> La tension $V_{an}$ onduleur deux niveaux par MLI sinus triangulaire.....	49
<b>Figure II. 27:</b> La tension $V_p$ et $V_{\text{réf}}$ avec $m=12$ et $r=0.8$ .....	49
<b>Figure II. 28:</b> La tension simple $V_{ao}$ onduleur trois niveaux par MLI sinus triangulaire .....	49
<b>Figure II. 29:</b> La tension composée $V_{ac}$ onduleur trois niveaux par MLI sinus triangulaire .....	50
<b>Figure II. 30:</b> La tension $V_{an}$ onduleur trois niveaux par MLI sinus triangulaire .....	50
<b>Figure II. 31:</b> La tension $V_p$ et $V_{\text{réf}}$ avec $m=12$ et $r=0.8$ .....	50
<b>Figure II. 32:</b> La tension simple $V_{ao}$ onduleur cinq niveaux par MLI sinus triangulaire .....	51
<b>Figure II. 33:</b> La tension composée $V_{ac}$ onduleur Cinq niveaux par MLI sinus triangulaire.....	51
<b>Figure II. 34:</b> La tension $V_{an}$ onduleur Cinq niveaux par MLI sinus triangulaire.....	51
<b>Figure II. 35:</b> La tension $V_p$ et $V_{\text{réf}}$ avec $m=12$ et $r=0.8$ .....	52
<b>Figure II. 36:</b> La tension simple $V_{ao}$ onduleur sept niveaux par MLI sinus triangulaire .....	52
<b>Figure II. 37:</b> La tension composée $V_{ac}$ onduleur sept niveaux par MLI sinus triangulaire .....	52
<b>Figure II. 38:</b> La tension $V_{an}$ onduleur sept niveaux par MLI sinus triangulaire.....	53

**Chapitre III :Description générale sur les gisements solaire et la production de l'énergie par le photovoltaïque.**

<b>Figure III. 1:</b> Position du soleil. ....	56
<b>Figure III.2:</b> Des cellules photovoltaïques .....	60
<b>Figure III. 3:</b> Structure d'une cellule photovoltaïque .....	61
<b>Figure III. 4:</b> Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque.....	62
<b>Figure III. 5:</b> Module photovoltaïque .....	62
<b>Figure III. 6:</b> Câblage des cellules dans un module.....	63
<b>Figure III. 7:</b> Panneau photovoltaïque .....	63
<b>Figure III. 8:</b> Boite de dérivation.....	64

<b>Figure III. 9:</b> Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque .....	65
<b>Figure III. 10:</b> Modèle de simulation d'un générateur PV.....	69
<b>Figure III. 11</b> Circuit équivalent d'un panneau photovoltaïque avec MATLAB.....	70
<b>Figure III. 12:</b> Diagramme puissance-fréquence des composants .....	73
<b>Figure III. 13:</b> Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	73
<b>Figure III. 14:</b> Schéma électrique d'un hacheur boost .....	74
<b>Figure III. 15:</b> Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost.....	75
<b>Figure III. 16:</b> Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.....	75
<b>Figure III. 17:</b> Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.....	76
<b>Figure III. 18:</b> Algorithme incrémental conductance.....	79
<b>Figure III. 19:</b> Schéma de converge vers le PPM par P&O .....	80
<b>Figure III. 20:</b> Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O) .....	80
<b>Figure III. 21:</b> Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O).....	81
<b>Figure III. 22:</b> Schéma d'un système photovoltaïque avec convertisseur DC-DC commandé par la MPPT	81
<b>Figure III. 23:</b> Schéma de simulation d'un PV et un hacheur commandé en MPPT .....	82
<b>Figure III. 24:</b> Le courant de panneau .....	82
<b>Figure III.25:</b> la tension de panneau.....	83
<b>Figure III. 26:</b> La puissance de module photovoltaïque.....	83
<b>Figure III. 27:</b> La tension de sortie de hacheur.....	84
<b>Figure III. 28:</b> Le courant de sortie de hacheur .....	84
<b>Figure III. 29:</b> Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé .....	85
<b>Figure III. 30:</b> Onduleur triphasé à trois niveaux .....	85
<b>Figure III. 31:</b> Principe de la commande MLI et les impulsions d'un interrupteur .....	87

#### **Chapitre IV :Raccordement des systèmes PV au réseau.**

<b>Figure IV. 1:</b> Schéma générale de production, transport et distribution de l'énergie électrique.....	88
<b>Figure IV. 2:</b> Système de tensions triphasé équilibré.....	90
<b>Figure IV. 3:</b> Schéma de simulation de réseau .....	91
<b>Figure IV. 4:</b> Schéma de simulation global PV raccordé au réseau .....	92
<b>Figure IV. 5:</b> Bloc de voltage source Controller.....	92
<b>Figure IV. 6:</b> bloc de pll.....	93

<b>Figure IV. 7:</b> La tension $V_{dc}$ mes et $V_{dc}$ reff .....	93
<b>Figure IV. 8:</b> la tension simple de sortie de l'onduleur 3 niveaux.....	94
<b>Figure IV. 9 :</b> la tension simple de l'onduleur 3 niveaux.....	94
<b>Figure IV. 10:</b> Le courant $I_{d\text{ ref}}$ et $I_d$ .....	94
<b>Figure IV. 11:</b> le courant $I_{q\text{ ref}}$ et $I_q$ .....	95
<b>Figure IV. 12:</b> la tension injectée dans le réseau .....	95

## Liste des tableaux :

### **Chapitre I : *Les principales topologies des convertisseurs multi niveaux***

<b>Tableau I. 1:</b> Etats possibles de l'onduleur NPC à 3 niveaux.....	06
<b>Tableau I. 2:</b> Etats possibles de l'onduleur NPC à m étages avec .....	08
<b>Tableau I. 3:</b> Etats possibles de l'onduleur à cellules imbriquées à m cellules avec .....	11

### **Chapitre II :*Modélisation et simulation des onduleurs multi niveaux à commande pleine onde et à commande (MLI).***

<b>Tableau II. 1:</b> Grandeur connue pour chacune des configurations d'un bras .....	28
<b>Tableau II. 3:</b> Table de commutation de l'onduleur NPC à 5 niveaux.....	38
<b>Tableau II. 4:</b> Table de commutation de l'onduleur NPC à sept niveaux .....	46

### **Chapitre III :*Description générale sur les gisements solaire et la production de l'énergie par le photovoltaïque.***

<b>Tableau III. 1:</b> Evénements notables dans l'histoire du photovoltaïques [10]. .....	58
<b>Tableau III. 2:</b> Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque "BP SX 150" .....	68

# SOMMAIRE

Remerciement	
Dédicace	
Liste symboles et abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	01
<b>Chapitre I : Les principales topologies des convertisseurs multi niveaux</b>	
I.1. Introduction.....	03
I.2. Principales topologies d'onduleurs multi niveaux .....	04
I.2.1. Onduleurs NPC .....	04
I.2.2. Principes de base de la branche 3 niveaux.....	04
I.2.3. Généralisation de la structure.....	06
I.2.4. Propriétés .....	09
I.3. Onduleurs à cellules imbriquées .....	09
I.3.1. Principes de base .....	09
I.3.2. Propriétés .....	11
I.3.3. Extension - généralisation : l'ondeur SMC.....	12
I.3.4. Onduleurs multi niveaux symétriques .....	12
I.3.5. Principes de base .....	13
I.3.6. Alimentation des cellules.....	13
I.3.7. Variante des onduleurs multi niveaux symétriques.....	14
I.4. Onduleurs multi niveaux asymétriques .....	15
I.4.1. Alimentation des onduleurs multi niveaux asymétriques.....	16
I.4.2. Variantes d'onduleurs multi niveaux asymétriques .....	16
I.5. Propriétés des principales structures .....	17
I.5.1. Classification des topologies selon leur alimentation .....	17

I.5.2.Nombres de composants nécessaires.....	17
I.6.Conclusion .....	20

**Chapitre II :Modélisation et simulation des onduleurs multi niveaux à commande pleine onde et à commande (MLI).**

II.1. Introduction .....	22
II.2. Intérêt des convertisseurs multi niveaux .....	22
II.2.1. Les convertisseurs multi niveaux présentent quelques avantages [22] :.....	22
II.3. Modèle de l'onduleur à deux niveaux.....	23
II.4. Modélisation de l'onduleur à trois niveaux de type NPC .....	24
II.4.1. Structure de l'onduleur à trois niveaux : .....	24
II.4.2. Configurations et fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux .....	25
II.4.3. Modèle de connaissance de l'onduleur à trois niveaux.....	28
II.4.4. Fonctions de connexion des interrupteurs .....	29
II.4.5. Fonctions de connexion des demi-bras .....	29
II.5. Onduleur à cinq niveaux de type NPC : .....	33
II.5.1. Structure de l'onduleur à cinq niveaux.....	33
II.5.2. Différentes configurations d'un bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux .....	34
II.6. Onduleur à sept niveaux de type NPC .....	38
II.6.1. Structure de l'onduleur à sept niveaux .....	38
II.6.2. Différentes configurations d'un bras de l'onduleur NPC à sept niveaux.....	39
II.7. Commande de l'onduleur par modulation de largeur d'impulsions MLI .....	46
II.8. Simulation :.....	47
II.8.1. Onduleur deux niveaux : .....	47
II.8.2. Onduleur trois niveaux : .....	48
II.8.3. Onduleur cinq niveaux : .....	49
II.8.4. Onduleur sept niveaux : .....	51
II.9. Conclusion.....	52

**Chapitre III :Description générale sur les gisements solaire et la production de l'énergie par le photovoltaïque.**

III.1. Introduction :	53
III.2. L'énergie solaire :	53
III.3. Principes de calcul de l'énergie solaire :	54
III.3.1. La latitude ( ):	54
III.3.2. La longitude (l):	54
III.3.3. L'altitude:	54
III.3.4. La déclinaison ( ):	54
III.3.5. Le temps solaire vrai (TSV):	54
III.3.6. La durée et le taux d'insolation :	55
III.3.7. L'angle horaire:	55
III.3.8. Position du soleil:	55
III.4. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire :	57
III.4.1. Rayonnement direct:	57
III.4.2. Rayonnement diffuse :	57
III.4.3. Rayonnement réfléchi:	57
III.4.4. Rayonnement global:	57
III.5. Terminologie « photovoltaïque » - les dates importantes :	57
III.6. Cellules photovoltaïques :	59
III.6.1. Type des cellules photovoltaïques :	59
III.6.2. Principe de fonctionnement d'une cellule au silicium cristallin :	61
III.7. Module photovoltaïque :	62
III.8. Panneau photovoltaïque :	63
III.9. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :	65
III.9.1. Modèle de cellule :	65
III.10. Avantages et inconvénients d'une installation PV :	70

III.10.1. Avantage :	70
III.10.2. Inconvénient :	71
III.11. Electronique de puissance :	71
III.11.1. Electronique de puissance et la conversion électrique :	72
III.11.2. Convertisseurs électriques :	72
III.11.3. Les Interrupteurs :	72
III.12. Les Hacheurs :	73
III.12.1. Exigences de l'utilisateur :	73
III.12.2. Hacheur boost :	74
III.13. Commande MPPT:	76
III.14. Les méthodes de poursuite de MPP :	77
III.14.1. Méthodes a contre réaction de tension :	77
III.14.2. Méthodes a contre réaction de courant :	77
III.14.3. Méthodes a contre réaction de puissance :	77
III.14.3.1. Algorithme incrémentation de la conductance :	78
III.14.3.2. Algorithme perturbation et observation :	79
III.15. Simulation du system photovoltaïque avec hacheur commandé en MPPT: :	81
III.15.1. Schéma de simulation :	82
III.15.2. Résultat de simulation:	82
III.16. Les onduleurs :	84
III.16.1. Structure d'onduleur :	85
III.16.2. Principe de fonctionnement :	86
III.16.3. Commande MLI :	86
III.16.4. Elimination d'Harmoniques sélective.	86
III.17. Conclusion :	87

## **Chapitre IV :Raccordement des systèmes PV au réseau.**

IV.1. Introduction : .....	88
IV.2. Réseau électrique :.....	88
IV.3.Problème de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau :.....	89
IV.4.Perturbations des réseaux électriques :.....	89
IV.5.Modélisation de réseau BT : .....	90
IV.5.1Modèlemathématique: .....	90
IV.5.2.Schéma de simulation de réseau :.....	91
IV.6.Simulation global de PV raccordé au réseau : .....	91
IV.6.1.Schéma de simulation: .....	91
IV.6.2.Résultat de simulation:.....	93
IV.7. Conclusion : .....	95

Conclusion Générale

Références bibliographiques

# Introduction Générale

---

## **INTRODUCTION GENERALE**

Les énergies renouvelables se manifestent comme une solution potentielle à la réduction de la pollution. Parmi les moyens de production prometteurs (éolien, hydraulique...), le photovoltaïque (PV) apparaît aujourd'hui comme le plus approprié et le plus abouti à la production d'électricité d'origine renouvelable pour l'habitat. Ajoutons à cela la libéralisation du marché de l'électricité qui introduit des changements majeurs dans le domaine de l'énergie. La multiplication des producteurs indépendants et des productions décentralisées [1].

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est en forte croissance depuis quelques années car c'est une source inépuisable, non polluante pour l'environnement, silencieuse et non dérangeante pour les riverains. Le développement rapide de l'énergie solaire est apparu progressivement sous forme d'installations de petites puissances raccordées au réseau à Basse Tension (BT) et de fermes solaires connectées directement au réseau à Moyenne Tension (HTA).

Cependant, le raccordement des systèmes PV au réseau de distribution peut avoir quelques impacts sur les réseaux électriques : impacts sur le changement des flux de puissance (bidirectionnel), sur le plan de tension, sur le plan de protection, sur la qualité de l'énergie ou sur la planification du réseau... D'un autre côté, les caractéristiques, le fonctionnement et les perturbations sur les réseaux de distribution peuvent influencer le fonctionnement des systèmes PV.

Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre, nous traitons les principales topologies des convertisseurs multiniveaux: leurs structures et analyse fonctionnelle, leurs avantages et leurs inconvénients, ainsi que la terminologie des convertisseurs multiniveaux.
- Le deuxième chapitre fera l'objet de la modélisation et simulation des onduleurs multiniveaux à commande pleine onde et à commander (MLI).

- Le troisième chapitre, on fait une description générale sur les gisements solaire et la production de l'énergie par le photovoltaïque et décrit une étude préliminaire des convertisseurs DC/DC et DC-AC, et leur principe et les différents types existants. Nous avons aussi présenté leur modèle mathématique ainsi que leur commande.
- Dans le quatrième chapitre présente la structure actuelle du réseau électrique. La modélisation des composants du réseau de distribution ainsi que le raccordement des systèmes PV au réseau.

# Chapitre I

*Les principales topologies des convertisseurs  
multi niveaux*

### **I.1. Introduction**

Les convertisseurs statiques à base de semi-conducteurs de puissance sont présents dans des applications très variées. On les trouve aussi bien dans les appareils électroménagers que dans la traction ferroviaire, dans nos voitures et aussi dans les engins spatiaux, dans les processus industriels et dans les salles des hôpitaux.

On peut imaginer le convertisseur statique comme l'outil par lequel l'énergie électrique, représentée par les grandeurs tension et courant, est aménagée et fournie de la façon la plus convenable à l'utilisation finale (machine ou appareil électrique).

Si l'introduction des premiers convertisseurs statiques représentait déjà un progrès très important dans la conversion et le traitement de l'énergie électrique, les hautes performances des convertisseurs d'aujourd'hui ont été possible grâce au progrès dans plusieurs domaines, et notamment dans les domaines de semi-conducteurs de puissance, des microprocesseurs et des nouvelles techniques pour la commande et l'association de ces composants.

D'autre part, il faut aussi remarquer que la réalisation de convertisseur multiniveaux pose des contraintes et des problèmes dont on peut citer les suivants :

- Besoin d'un plus important nombre de composants.
- La répartition équilibrée de la tension d'alimentation parmi les interrupteurs mise en série.
- Commande plus complexes.

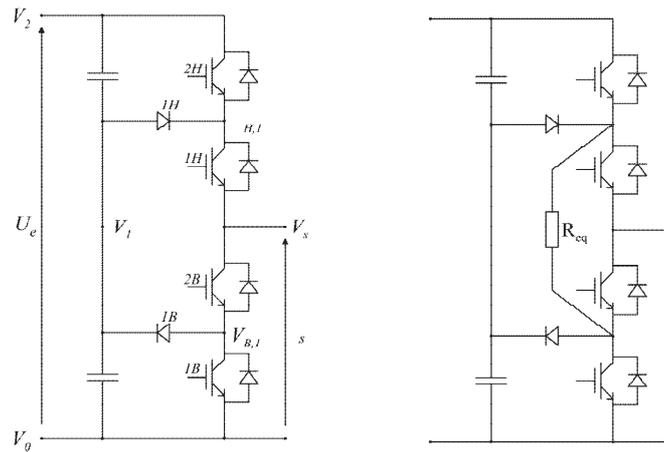
## **I.2. Principales topologies d'onduleurs multiniveaux**

### **I.2.1. Onduleurs NPC**

Cette structure d'onduleur multiniveau a été introduite par A. Nabae et H. Akagi en 1981 dans [1]. L'objectif était de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'onduleur dans la charge pour des applications de type alimentation de moteur.

### **I.2.2. Principes de base de la branche 3 niveaux**

Dans sa version la plus simple, chaque branche de cet onduleur comporte 4 interrupteurs contrôlables et 6 diodes, comme représenté à la Fig. 1.1. Ce montage est alimenté par une tension continue  $U_e$  entre les bornes  $V_0$  et  $V_2$ . Les 3 états de commutation possibles permettent de délivrer 3 niveaux distincts et positifs entre les bornes  $V_S$  et  $V_0$ . Chaque branche comporte 2 étages constitués chacun de 2 interrupteurs de type transistor  $T_{jH}$  et  $T_{jB}$  avec des diodes antiparallèles.



**Figure I. 1:** Schéma d'une branche d'onduleur NPC à 3 niveaux : (a) sans résistance d'équilibrage (b) avec résistance d'équilibrage

**Génération des niveaux maximum et minimum**

Lorsque les 2 étages sont commandés simultanément de la même manière, les diodes  $D_{1H}$  et  $D_{1B}$  ne conduisent pas et ce montage fonctionne alors comme une branche de pont à 2 transistors générant les niveaux 0 et  $U_e$  entre  $V_S$  et  $V_0$ .

**Génération du niveau intermédiaire**

Lorsque  $T_{1H}$  et  $T_{2B}$  conduisent, et qu'en conséquence  $T_{1B}$  et  $T_{2H}$  sont bloqués, la diode  $D_{1H}$  lie le point milieu  $V_1$  aux nœuds  $V_{H, 1}$  et  $V_S$  pour les courants sortants. La diode  $D_{1B}$  lie le point milieu  $V_1$  aux nœuds  $V_{B, 1}$  et  $V_S$  pour les courants entrants. Cela revient à lier le point milieu  $V_1$  avec la sortie  $V_S$ , indépendamment du signe du courant et cela permet de générer un niveau intermédiaire  $V_1 = \frac{U_e}{2}$  entre  $V_2$  et  $V_0$ .

**Existence d'un niveau indéfini**

La commande complémentaire de l'état intermédiaire conduit à lier la sortie  $V_S$  au niveau Diodes supplémentaires  $D_{1H}$  et  $D_{1B}$  permettent de relier les étages intermédiaires  $V_{H, 1}$  et  $V_{B, 1}$  au point milieu  $V_1$ .

$V_2$  pour un courant entrant et au niveau  $V_0$  pour un courant sortant.

Cet état est donc indéfini et par conséquent interdit dans le fonctionnement normal de l'onduleur. Les 3 états de commutation possible sont résumés au Tab. 1.1.

$T_{2H}$	$T_{1H}$	$T_{2B}$	$T_{1B}$	$U_s$
1	1	0	0	$U_e$
0	0	1	1	0
0	1	1	0	$\frac{U_e}{2}$
1	0	0	1	Indéfini

**Tableau I. 1:** Etats possibles de l'onduleur NPC à 3 niveaux

**Contraintes imposées aux interrupteurs**

Lorsque  $T_{2H}$  et  $T_{1H}$  sont bloqués, le potentiel du point  $V_{H, 1}$  est maintenu à une valeur plus haute ou égale à celui du point milieu  $V_1$ . Rien n'empêche au potentiel de  $V_{H, 1}$  de monter plus haut que le potentiel du point milieu, ce qui conduit au claquage du transistor  $T_{1H}$  qui est dimensionné pour bloquer la demi tension intermédiaire  $U_e$ . Il en va de même pour  $T_{2B}$ . Une résistance placée entre  $V_{H, 1}$  et  $V_{B, 1}$  permet d'assurer que la tension bloquée se répartisse entre les deux interrupteurs. Le montage peut alors être réalisé à l'aide de composants bloquant la demi-tension d'alimentation  $U_e$ .

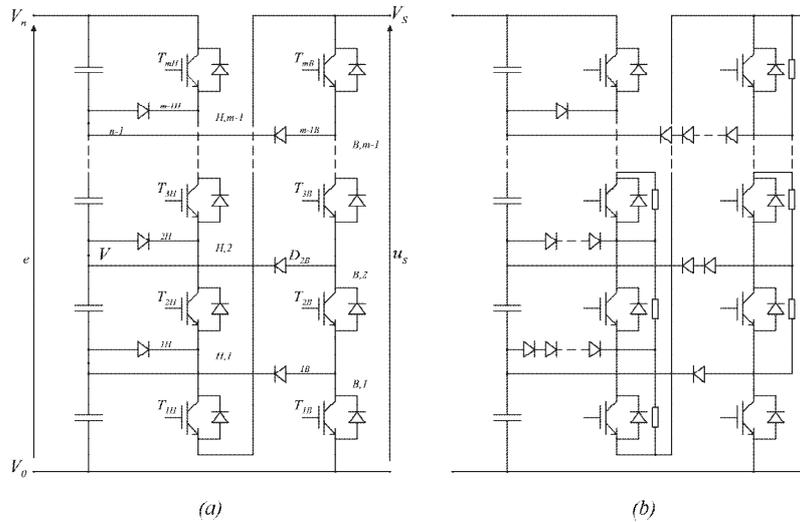
**I.2.3. Généralisation de la structure**

La structure de l'onduleur NPC a par la suite été étendue pour augmenter la tension et le nombre de niveaux [2]. La Fig. I.2 montre un schéma possible de brancher d'onduleur NPC constitué de  $m$  étages. Les condensateurs  $C_1$  à  $C_m$  permettent de diviser la tension d'entrée. Les interrupteurs  $T_{1, p}$  à  $T_{m, p}$  font circuler les courants sortant conjointement avec les diodes  $D_{0, p}$  à  $D_{m-1, p}$ , alors que les interrupteurs  $T_{1, N}$  à  $T_{m, N}$  font circuler les courants entrant avec les diodes  $D_{1, N}$  à  $D_{m, N}$ . L'ensemble forme une cellule de commutation.

**Règles de commande**

Pour générer le niveau  $V_k$ , les interrupteurs  $T_{1, p}$  à  $T_{m, p}$  et  $T_{k+1, N}$  à  $T_{m, N}$  doivent être fermés. Partant du niveau  $V_k$  de l'alimentation, les courant sortants circulent de la diode  $D_{k, p}$  aux transistors  $T_{1, p}$  à  $T_{k, p}$  vers la sortie  $V_S$ . Au contraire, les courants rentrants circulent de la sortie  $V_S$  à travers les transistors  $T_{m, N}$  à  $T_{k+1, N}$ , pour être ensuite ramenés vers le niveau de l'alimentation  $V_k$  à travers la diode  $D_{m, N}$ . L'application de ces règles conduit à  $m + 1$  états possibles pour la commande. Ils permettent de générer  $m+1$  niveaux distincts comme résumé dans le TAB. I.2. Tous les autres états sont indéfinis et interdits.

**Contraintes appliquées aux interrupteurs**



De par la présence de la diode  $D_{m-1, p}$  la tension aux bornes du transistor  $T_{m, p}$  ne peut pas dépasser le pas de l'onduleur  $\Delta U = V_{k+1} - V_k$ . Elle peut en revanche être plus petite. Ainsi, la tension aux bornes du transistor  $T_{m-Dk, p}$  peut valoir de 0 à  $(k + 1) \Delta U$ . La structure n'assure pas que la tension bloquée se répartisse également aux bornes des interrupteurs bloqués. Il faut placer des résistances de manière à assurer l'équilibre statique des interrupteurs bloqués. De plus, pour assurer le bon fonctionnement de l'onduleur, il faut assurer la stabilisation des tensions des condensateurs formant le pont diviseur d'alimentation. En fonctionnement normal, lorsque l'équilibre est maintenu, chaque interrupteur bloque la tension correspondant au pas  $\Delta U$ .

De l'étude des contraintes appliquées aux interrupteurs, il découle que les diodes n'ont pas la même tension de blocage. Lorsque le niveau  $V_m$  est généré, la diode  $D_{j, p}$  doit bloquer la tension  $(m - j) \Delta U$ . Lorsque le niveau  $V_0$  est généré, la diode  $D_{j, N}$  doit bloquer la tension  $j \Delta U$ . L'onduleur NPC 3 niveaux n'a qu'un niveau intermédiaire, de sorte que la tension de blocage est la même pour toutes ses diodes. Dans les autres cas, il faut prévoir une mise en série des diodes et des dispositifs d'équilibrage des tensions à l'état bloqué. F.Z. Peng propose de régler ce problème par des liaisons supplémentaires entre les diodes, ce qui permet d'éviter l'ajout de dispositifs d'équilibrage pour les diodes [3].

$T_{mH}$	$T_{m-1H}$	...	$T_{3H}$	$T_{2H}$	$T_{1H}$	$U_s$
0	0	...	0	0	0	0
0	0	...	0	0	1	$\Delta U$
0	0	...	0	1	1	$2\Delta U$
...	...	...	...	...	...	...
0	1	...	1	1	1	$m\Delta U$
1	1	...	1	1	1	$(m+1)\Delta U$

**Tableau I. 2:** Etats possibles de l'onduleur NPC à  $m$  étages avec

**Nombre de composants nécessaires**

De l'étude des contraintes, nous déduisons que le nombre de diodes croît avec le carré du nombre d'étages. Pour générer  $m + 1$  niveaux,  $m$  étages sont nécessaires, il faut  $m$  sources de tension en série,  $2 \cdot m$  transistors et  $m^2 + m$  diodes.  $2 \cdot m$  diodes sont généralement intégrées aux transistors, ce qui réduit à  $m^2 - m$  le nombre de diodes additionnelles.

**Charge des interrupteurs**

Les règles de commande et les contraintes permettent de déduire que, dans tous les cas, le courant traverse  $m$  interrupteurs, diodes et transistors compris. Le nombre de diodes croît beaucoup plus vite que le nombre d'étages et de niveaux. La charge en termes de courant de crête est la même pour tous les composants ; en revanche la charge en termes de courant nominal n'est pas la même pour tous les interrupteurs. Elle est plus faible pour les diodes de liaison aux niveaux intermédiaires (clamping diodes). Chacun des groupes de diodes n'est traversé par le courant que lorsque le niveau intermédiaire correspondant est généré. Au contraire, la charge des interrupteurs de type transistors ainsi que celle des diodes antiparallèles est d'autant plus élevée que l'interrupteur considéré est placé proche de la sortie.

**Onduleur complet**

Pour faire un convertisseur monophasé bipolaire, il faut 2 branches partageant les mêmes sources de tension. Il en faut 3 pour un convertisseur triphasé.

### I.2.4. Propriétés

Cette topologie permet la conversion multiniveau sans faire transiter la puissance par des convertisseurs DC-DC. Elle peut être généralisée pour les applications polyphasées en utilisant les mêmes tensions d'entrée pour les différentes phases. Cela permet une meilleure répartition de la puissance. Pratiquement, cela facilite l'équilibrage des tensions intermédiaires, car seule la tension totale est connectée à une source active, tandis que les autres sources de tension sont réduites à de simples condensateurs, qui ne peuvent pas fournir d'énergie.

Le nombre de diodes croît avec le carré du nombre d'étages et les interrupteurs ne sont pas chargés de la même manière. Comme il n'y a pas de niveaux redondants, les déséquilibres des tensions intermédiaires ne peuvent être compensés que par une action sur le mode commun, ou par une distorsion des modes différentiels. Ce type de compensation est d'autant plus délicat à pratiquer que le nombre de tensions à régler est grand. Cette structure ne paraît pas très adaptée pour la génération d'un grand nombre de niveaux.

### I.3. Onduleurs à cellules imbriquées

Cette structure a été introduite en 1992 par T. Meynard et H. Foch dans [4]. Elle est également connue sous l'appellation « *flying capacitors multilevel inverter* » dans la littérature anglo-saxonne.

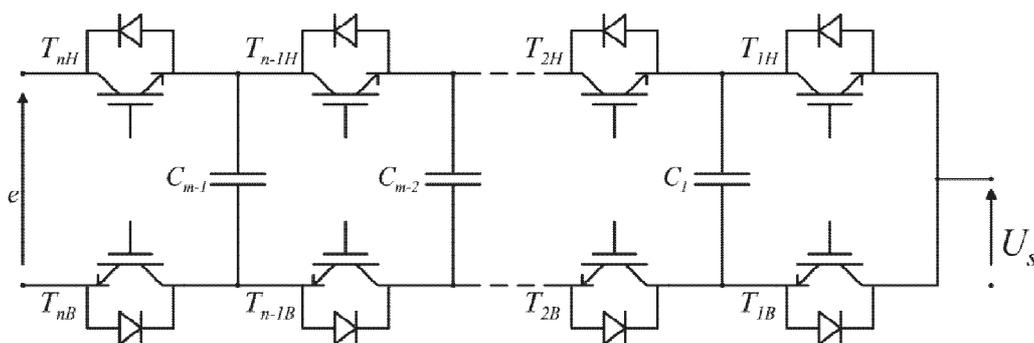


Figure I. 1: Schéma d'une branche d'onduleur multi niveau à cellules imbriquées

#### I.3.1.Principes de base

La Fig. I.4 illustre le schéma de principe en échelle d'une branche d'onduleur à  $m$  cellules imbriquées. Chaque paire d'interrupteurs situés sur la même verticale forme une cellule de commutation dont les interrupteurs sont commandés de manière complémentaire. Toutes les combinaisons de signaux de commande respectant cette complémentarité sont autorisées. Cet onduleur a donc  $2^m$  états possibles pour la commande. Dans son

fonctionnement habituel, lorsque les tensions aux bornes des condensateurs sont équilibrées, la tension aux bornes du condensateur  $C_k$  vaut :

$$U_{C,k} = \frac{k}{m} \cdot U_e \quad (\text{I.1})$$

Cela implique que chaque interrupteur doit bloquer une fraction de la tension égale au pas de l'onduleur :

$$U_{\text{blocage}} = U_{C,k} - U_{C,k-1} = \frac{U_e}{m} = \Delta U \quad (\text{I.2})$$

### **Contraintes**

La tension supportée par les condensateurs croît avec l'indice de la cellule. Cela entraîne un accroissement de la différence de potentiel entre les interrupteurs complémentaires de la cellule de commutation et de la distance entre ses interrupteurs. La dimension de la maille de commutation et la valeur de l'inductance de fuite associée augmentent, entraînant un accroissement des pertes par commutation. En conséquence, les cellules de bas indice sont plus adaptées à la commutation.

En prenant des composants identiques, le nombre de condensateurs supportant une tension nominale égale au pas, croît avec le carré du nombre de cellules :

$$N_C = \frac{m^2 - m}{2} \quad (\text{I.3})$$

Contrairement à l'onduleur NPC, cette structure assure naturellement la répartition statique de la tension bloquée aux bornes des interrupteurs. En revanche, si les condensateurs (haute tension) sont réalisés par mise en série de condensateurs identiques, ils auront besoin d'être équilibrés.

### **Onduleur complet**

Comme pour l'onduleur NPC, il faut 2 branches pour faire un onduleur monophasé bipolaire et 3 pour réaliser un onduleur triphasé. Les bornes d'entrées continues sont les mêmes pour les différentes branches, mais à la différence de l'onduleur NPC, les condensateurs des cellules ne sont pas partagés entre les différentes phases.

### **Niveaux générés**

Cet onduleur est capable de générer  $m + 1$  niveaux distincts. Il possède par conséquent  $2^m - m - 1$  états de commutation conduisant à des niveaux redondants.

Pour simplifier les explications, nous dirons qu'une cellule de commutation est dans l'état bas lorsque l'interrupteur du bas est passant, et qu'elle est dans l'état haut dans le cas contraire. Une seule combinaison conduit au niveau 0 : toutes les cellules dans l'état bas. Les  $m$  combinaisons possibles pour lesquelles une seule cellule de commutation est dans l'état haut conduisent au niveau  $\frac{U_e}{m}$ . Les  $C_2^m$  combinaisons pour lesquelles deux cellules de commutation sont dans l'état haut conduisent au niveau  $\frac{2 \cdot U_e}{m}$ . Ainsi de suite, jusqu'au niveau  $U_e$  qui ne peut être obtenu que lorsque toutes les cellules sont dans l'état haut. Quelques exemples d'états et des niveaux associés sont représentés au TAB. I.3

$T_mH$	$T_{m-1}H$	...	$T_3H$	$T_2H$	$T_1H$	$U_s$
0	0	...	0	0	0	0
0	0	...	0	0	1	$\Delta U$
0	0	...	0	1	0	$\Delta U$
...	...	...	...	...	...	...
1	0	...	0	1	1	$3\Delta U$
...	...	...	...	...	...	...
1	1	...	1	1	0	$(m-1)\Delta U$
1	1	...	1	1	1	$m\Delta U$

**Tableau I. 3:** Etats possibles de l'onduleur à cellules imbriquées à  $m$  cellules avec  $\Delta U = \frac{U_e}{m}$

### **Dimensionnement avec des interrupteurs de tensions de blocage différentes**

Le dimensionnement d'une structure à cellules imbriquées avec des interrupteurs bloquant des tensions différentes devrait permettre de diminuer le nombre d'états générant des niveaux redondants et en même temps d'augmenter le nombre de niveaux généraux. Toutefois, le choix parmi l'ensemble des états permettant de générer un niveau donné est principalement dicté par des soucis d'équilibrage des tensions d'alimentation des cellules. Dans ce contexte, un tel dimensionnement est difficilement envisageable parce qu'il diminue les possibilités d'équilibrage. L'équilibrage des puissances est par ailleurs un des soucis majeurs des onduleurs multi niveaux asymétriques étudiés dans cette thèse.

#### **I.3.2. Propriétés**

Comme l'onduleur NPC, cette topologie permet la conversion multi niveau sans faire transiter la puissance par des convertisseurs DC-DC. En revanche la réalisation d'un convertisseur polyphasé passe par l'emploi de convertisseurs indépendants avec des sources de tension indépendantes, excepté pour la tension d'entrée qui peut être commune. Du point de vue du transit de puissance, ce convertisseur polyphasé se comporte donc comme plusieurs

convertisseurs monophasés indépendants. Il y a toutefois la possibilité d'équilibrer un peu la puissance entre les phases par la gestion de la composante homopolaire.

### I.3.3. Extension - généralisation : l'onduleur SMC

Le fait que le nombre de condensateurs croisse avec le carré du nombre de cellules semble constituer un des principaux inconvénients des onduleurs à cellules imbriquées.

Les onduleurs SMC (Stacked Multicell Converter) ont été introduits par Delmas et al[5]. Ils sont issus d'un mariage entre le NPC et les onduleurs à cellules imbriquées. L'objectif est de proposer une alternative à ces derniers onduleurs avec moins d'énergie stockée dans les condensateurs en vue d'une réduction de coût et d'encombrement. Cette structure est illustrée à la Fig. 1.5. Les onduleurs SMC sont caractérisés par leurs nombres de cellules et d'étages (ou piles pour respecter la terminologie anglo-saxonne). Un convertisseur avec un seul étage n'est autre qu'un convertisseur à cellules imbriquées tel que décrit précédemment.

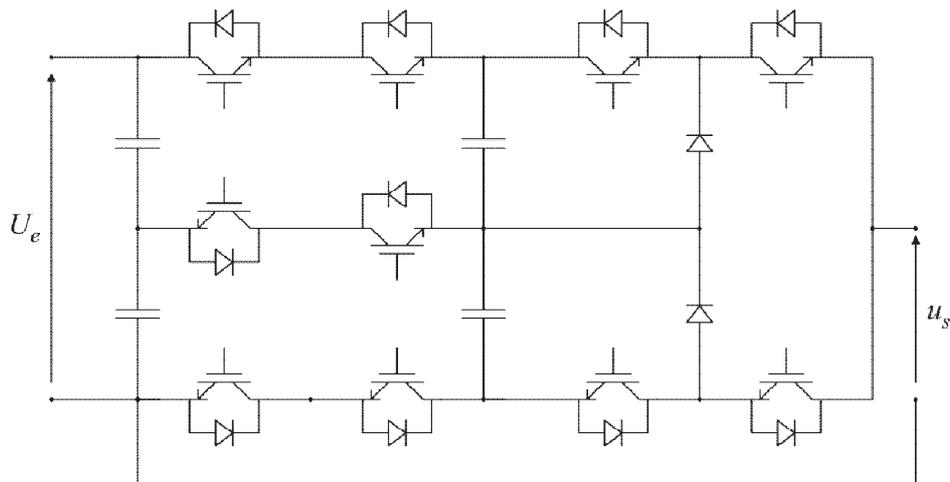


Figure I. 2: Schéma d'une branche d'onduleur SMC 5 niveaux à 2 cellules 2 étages

### I.3.4. Onduleurs multiniveaux symétriques

La dénomination complète de cette topologie, introduite par Marchesoni et al. en 1988 [6], devrait être onduleur multiniveaux symétriques à cellules en série.

Ces onduleurs sont également connus sous l'appellation «*onduleurs multiniveaux cascades*» («*cascade multilevel inverter*» dans la littérature anglosaxonne). Cette dénomination est imprécise, elle provient du fait que la structure n'a tout d'abord été employée qu'avec des cellules symétriques, de sorte que la précision était superflue. Cependant pour être précis, il faudrait maintenant parler d'*onduleur multiniveaux cascades symétriques*, l'omission de l'adjectif symétrique sous-entendant qu'il peut s'agir aussi bien

d'une configuration symétrique que d'une configuration asymétrique qui fait l'objet de cette thèse.

### **I.3.5. Principes de base**

Le principe assez naturel consiste à connecter en série des ponts en H, comme illustré à la Fig.I.6.

En ne prenant en considération que les 3 niveaux distincts générés par chacune de ses cellules, un convertisseur composé de  $m$  ponts en H connectés en série dispose de  $3^m$  états de commutation distincts. Dans la plupart des cas, les cellules sont équivalentes et il y a autant de manières de générer un niveau, qu'il y a de permutations possibles des cellules, et de combinaisons distinctes de niveaux d'onduleur conduisant à cette valeur.

A titre d'exemple, un convertisseur composé de 4 cellules possède deux combinaisons de niveaux conduisant à 2:

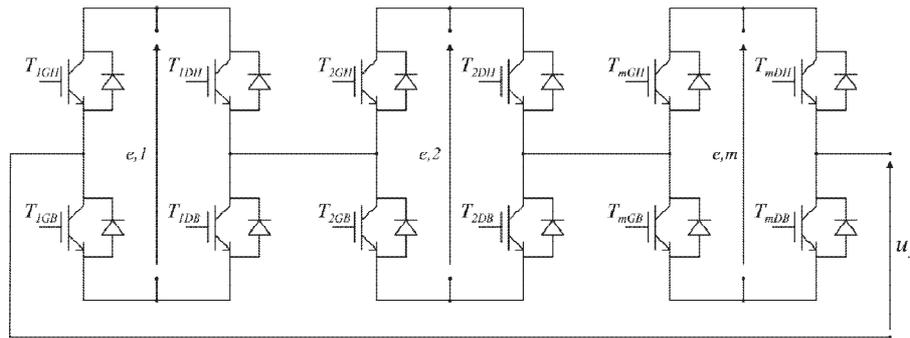
$us,1$	$us,2$	$us,3$	$us,4$	$U_s$
+1	+1	0	0	+2
+1	+1	+1	-1	+2

Pour la première combinaison, 6 permutations des cellules sont possibles, 4 pour la deuxième, ce qui fait un total de 10 possibilités pour générer le niveau 2 sur un total de  $3^4=81$  états possibles. A priori, la commande doit permettre de répartir la puissance et les commutations de manière équivalente sur les cellules [7].

### **I.3.6. Alimentation des cellules**

La principale difficulté de cette topologie réside dans l'alimentation des ponts en H. Il faut autant d'alimentations isolées les unes des autres qu'il y a de cellules.

Pour des applications ne nécessitant pas d'apport de puissance active, on peut se passer d'alimentation et se contenter d'éléments stockeurs, comme des condensateurs. C'est par exemple le cas avec la compensation statique de réactif ou d'harmoniques. Cette structure est très avantageuse pour ce type d'applications.



**Figure I. 3:** Schéma d'une branche d'onduleur multiniveau cascadié.

Il faut  $m$  tensions d'entrée isolées les unes des autres. Inconvénient étant que les échanges de puissance entre phases ne sont pas possibles, ce qui a pour effet d'augmenter les fluctuations de tension (par rapport à une structure permettant ces échanges).

Pour d'autres applications, lorsque la réversibilité en puissance n'est pas requise, on peut se contenter de réaliser les sources de tension avec des redresseurs à diode. P.W. Hammond [8] (solution Rubicon) propose d'alimenter les cellules à partir de redresseurs isolés les uns des autres par des transformateurs triphasés à fréquence industrielle. De plus par le biais de groupes horaires, les harmoniques injectés par les redresseurs du côté du réseau sont limités. Cette structure peut simplement être généralisée pour un grand nombre de niveaux. La tension d'isolation entre les différentes cellules, leurs alimentations et leurs commandes doit être celle de la tension complète de l'onduleur, ce qui ne va pas sans poser des problèmes de réalisation.

Pour certaines applications, la réversibilité en puissance est nécessaire. Cela peut être le cas en traction, lorsqu'on veut faire de la récupération au freinage. Dans sa thèse [7], N. Schibli propose d'alimenter les cellules à partir de convertisseurs DC-DC isolés les uns des autres par des transformatrices hautes fréquences.

### **I.3.7. Variante des onduleurs multiniveaux symétriques**

Le problème de l'isolation galvanique peut être contourné en effectuant la mise en série à travers une transformatrice basse fréquence. Pour cela, des onduleurs sont mis en parallèle du côté continu, leurs côtés alternatifs allant sur des enroulements primaires distincts d'un transformateur basse fréquence (à la fréquence de fonctionnement de la charge). Les contributions des différentes cellules sont ajoutées au niveau magnétique du noyau du transformateur, le secondaire étant constitué d'un seul enroulement haute-tension par phase.

Ce type de convertisseur a été réalisé industriellement pour une puissance de 100 MVA [9, 10].

D'autres variantes utilisant de la transformatrice basse fréquence ou de l'enroulement de moteur pour additionner les tensions ont été étudiées, parmi lesquelles on trouve [11].

### I.4. Onduleurs multiniveaux asymétriques

Ce type de structure est aussi appelé à juste titre « *onduleur hybride* ». Dans cette topologie dérivée de la précédente, le principe de mise en série de cellules de conversion est généralisé. Par degré d'hybridation croissant, on distingue trois types d'associations :

La mise en série de pont en H alimentés avec des tensions de différentes valeurs [12, 13], la mise en série d'onduleurs de topologies différentes (par exemple un onduleur NPC triphasé combiné avec des ponts en H monophasés [14, 15]), la mise en série de cellules de conversion de topologie et de nature différentes (par exemple pont en H et amplificateur linéaire [16])

Comme pour la mise en série de ponts en H, la seule contrainte porte sur les alimentations des cellules qui doivent être isolées les unes des autres.

Le concept peut être attribué à O.M. Mueller et J.N. Park qui ont publié le principe dans un article paru en 1994 [16]. Cet article portant sur une application assez pointue résume bien ce que l'on peut attendre de ce type de structure. Le cahier des charges était d'obtenir un convertisseur avec une tension de service, une rapidité, un rendement et une résolution élevés dans une application de résonance magnétique. Le concepteur de cette solution assez astucieuse l'a dénommée amplificateur quasi-linéaire. Les convertisseurs associés sont :

- Une cellule onduleur de tension élevée,
- Une cellule onduleur de tension trois fois plus faible,
- Une cellule amplificateur linéaire avec une tension six fois plus faible.

Cette structure est illustrée à la Fig.I.7. Les deux premières cellules de ce convertisseur permettent de générer 9 niveaux distincts. La dernière cellule permet de corriger l'erreur et d'obtenir une tension quasi-continue, c'est à dire une réponse quasi-linéaire entre la tension la plus basse et la plus haute. Par rapport à une solution avec amplificateur seul, les pertes sont fortement réduites, puisque l'amplificateur linéaire ne fait que corriger l'erreur qui n'est de l'ordre que d'une fraction de la tension d'alimentation. Cette structure possède toutes les caractéristiques d'un onduleur multiniveau asymétrique et en résumé bien l'essence : des

convertisseurs spécialisés sont combinés de sorte que chacun remplit le rôle pour lequel il est le mieux adapté. Le concept est simple, sa mise en œuvre est nettement plus complexe, notamment pour que chacun des convertisseurs travaille de manière optimale.

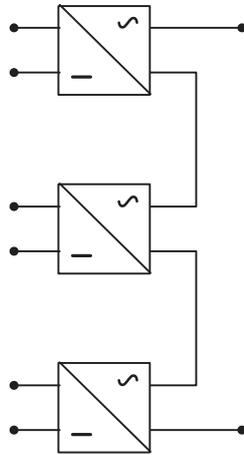


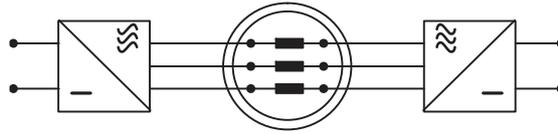
Figure I. 4: schéma de l'amplificateur quasi-linéaire proposé par Müller

### I.4.1. Alimentation des onduleurs multiniveaux asymétriques

Tout comme pour les onduleurs multiniveaux symétriques, la principale difficulté des onduleurs multiniveaux asymétriques réside dans la réalisation d'une alimentation performante, les alimentations des cellules devant être isolées les unes des autres. Le problème est même plus délicat, car il peut y avoir une circulation de puissance entre les cellules. Ce problème sera étudié en détail au chapitre 5.

### I.4.2. Variantes d'onduleurs multiniveaux asymétriques

Pour réduire le nombre d'alimentations nécessaires, dans le cadre d'applications de type alimentation de moteur, K.A. Corzine propose d'utiliser un moteur dont les bornes des phases sont accessibles [17, 18]. De cette manière, si les bobinages des phases ne sont pas reliés entre eux, par exemple par un couplage étoile, il est possible d'alimenter le moteur avec deux onduleurs triphasés connectés chacun d'un côté des enroulements, comme illustré à la Fig. 1.7. Les deux convertisseurs fournissent chacun une part de la tension du moteur. Ce type de connexion permet de limiter le nombre d'alimentations isolées à deux, alors que la mise en série de cellules en sortie d'un convertisseur triphasé en nécessite 4. Cela ne change pas la puissance moyenne fournie à la charge, mais cela permet de limiter un peu la circulation de puissance entre les alimentations des différentes phases. De manière tout à fait similaire à ce qui est fait dans cette étude, X. Kou constate qu'il est possible d'utiliser un rapport 4 entre les tensions d'alimentation de ces deux onduleurs triphasés [19].



**Figure I. 5:** Schéma de la structure asymétrique proposée par K.A. Corzine. X. Kou propose d'utiliser  $U_e, 2 = 4U_e, 1$ .

### I.5. Propriétés des principales structures

#### I.5.1. Classification des topologies selon leur alimentation

Les topologies telles que les onduleurs NPC et les onduleurs à cellules imbriquées divisent leur tension d'alimentation : la tension de sortie est plus petite ou égale à la tension continue d'entrée. Elles sont capables de fonctionner à partir d'une alimentation continue unique.

Au contraire, les structures telles que les onduleurs à cellules en série élèvent leur tension d'alimentation : la tension de sortie maximale est plus grande que chacune des tensions d'alimentation ; elle est plus petite ou égale à la somme des tensions d'alimentation. Contrairement aux autres topologies, les alimentations des cellules ne peuvent pas être obtenues à partir d'une alimentation continue unique sans mettre en place des convertisseurs additionnels. Dans la plupart des cas, il faut recourir à des transformateurs pour obtenir les alimentations nécessaires. Le couplage parallèle des transformateurs du «côté alimentation» et l'addition des tensions «côté charge» conduit à une élévation de la tension.

#### I.5.2. Nombres de composants nécessaires

A l'aide des tableaux suivants, nous comparons le nombre de composants nécessaires pour réaliser une branche d'onduleur, de tension de service et de nombre de niveaux donné, avec les 3 principales topologies d'onduleurs multiniveaux. Les composants sont supposés de taille identique. Tous les onduleurs sont supposés alimentés par une source de tension continue, les condensateurs intermédiaires ne sont donc pas comptabilisés pour les onduleurs en pont et pour les onduleurs à cellules imbriquées. Les condensateurs se trouvant à l'étage intermédiaire des onduleurs NPC sont partagés par les différentes phases, leur nombre est donc divisé par le nombre de branches. L'onduleur en pont est ajouté à la liste comme base de comparaison :  $m$  transistors sont mis en série pour former les macro-interrupteurs utilisés. Pour le cas le plus simple permettant d'obtenir

## Chapitre I: Les principales topologies des convertisseurs multi niveaux

3 niveaux par branche, nous obtenons :

<i>topologies</i>	<i>m</i>	<i>T</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>n</i>	<i>N<sub>E</sub></i>
<i>NPC</i>	2	4	6	<u>2</u>	3	3
<i>cellules imbriquées</i>	2	4	4	1	3	4
<i>cascade</i>	2	4	4	1	3	3
<i>pont simple</i>	2	4	4	0	2	2

5niveaux:

<i>topologies</i>	<i>m</i>	<i>T</i>	<i>D</i>	$C \frac{a}{b}$	<i>n</i>	<i>N<sub>E</sub></i>
<i>NPC</i>	4	8	20	4	5	5
<i>cellules imbriquées</i>	4	8	8	3	5	16
<i>cascade</i>	4	8	8	2	5	9
<i>pont simple</i>	4	8	8	0	2	2

<i>topologie</i>	<i>m</i>	<i>T</i>	<i>D</i>		<i>n</i>	<i>N<sub>E</sub></i>
<i>NPC</i>	6	12	56	$C \frac{6}{b}$	7	7
<i>cellules imbriquées</i>	6	12	12	6	7	64
<i>cascade</i>	6	12	12	3	7	27
<i>pont simple</i>	6	12	12	0	2	2

7niveaux:m+ 1 niveaux:

<i>topologie</i>	<i>m</i>	<i>T</i>	<i>D</i>		<i>n</i>	<i>N<sub>E</sub></i>
<i>NPC</i>	<i>m</i>	$2m$	$m^2 + m$		$m + 1$	$m + 1$
<i>cellules imbriquées</i>	<i>m</i>	$2m$	$2m$	$C \frac{2m}{b}$ $\frac{m^2 - 1}{2}$ $m$	$m + 1$	$2m$
<i>cascade</i>	<i>m</i>	$2m$	$2m$		$m + 1$	$3^{\frac{m+1}{2}}$
<i>pont simple</i>	<i>m</i>	$2m$	$2m$		2	2

Avec:

$m$ : le nombre d'étages ou de cellules,

$b$ : le nombre de branches, 2 en monophasés, 3 en triphasé,

$T$ : le nombre de transistors,

$D$ : le nombre de diodes,

$C$ : le nombre de condensateurs,

$n$ : nombre de niveaux obtenus,

$N_E$ : nombre d'états de commutation,

Du point de vue du nombre de composants, les onduleurs à cellules cascadiées paraissent être la solution multiniveau la plus avantageuse, surtout lorsque le nombre de niveaux devient important. C'est effectivement le cas pour les applications monophasées telles que le filtrage actif ou la compensation statique, lorsque le convertisseur n'a pas besoin de fournir d'énergie au système. Pour les applications triphasées et pour un petit nombre de niveaux, les onduleurs NPC sont intéressants, car les condensateurs sont partagés par les différentes branches, ce qui permet un équilibrage de la puissance circulant entre les phases. Cet équilibrage permet une réduction notable de la taille des condensateurs intermédiaires.

Lorsque le convertisseur doit échanger de l'énergie entre une source continue et une source alternative, il faut munir le convertisseur à cellules en cascade d'autant d'alimentations isolées les unes des autres qu'il y a de cellules. Pour une solution non-réversible en puissance, cela signifie l'ajout de  $m/2$  transformateurs triphasés à fréquence du réseau et autant de redresseurs, soit approximativement  $4m$  diodes. Le tableau comparatif EST alors modifié comme suit:

<i>topologie</i>	$m$	$T$	$D$	$C$	$n$	$N_E$	<i>autres comp.</i>
<i>NPC</i>	$m$	$2m$	$m^2 + m$	$\frac{2m}{b}$	$m + 1$	$m + 1$	
<i>Cell. Imbr.</i>	$m$	$2m$	$2m$	$\frac{m^2 - m}{2}$	$m + 1$	$2m$	
<i>cascade</i>	$m$	$2m$	$4m$	$m$	$m + 1$	$3^{\frac{m}{2}}$	$\frac{M_{transfo}}{b.f.}$ 2
<i>pont simple</i>	$m$	$2m$	$2m$	0	2	2	

Le convertisseur réversible en puissance nécessaire à l'alimentation des cellules de l'onduleur cascadié requiert  $m/2$  transformateurs moyenne ou haute fréquence et  $m/2$  convertisseurs AC-DC soit  $4m$  transistors et  $4m$  diodes. Le nombre de composants actifs est triplé. Le tableau comparatif est modifié comme suit :

<i>topologie</i>	$m$	$T$	$D$	$C$	$n$	$N_E$	<i>autres comp.</i>
<i>NPC</i>	$m$	$2m$	$m^2 + m$	$2m$	$m + 1$	$m + 1$	
<i>Cell. Imbr.</i>	$m$	$2m$	$2m$	$\frac{m^2 - m}{2}$	$m + 1$	$2m$	
<i>cascade</i>	$m$	$6m$	$6m$	$m$	$m + 1$	$3^{\frac{m}{2}}$	<i>Mtransfo h.f.2</i>
<i>pont simple</i>	$m$	$2m$	$2m$	$0$	$2$	$2$	

Cette première comparaison basée sur le nombre de composants permet de tirer quelques conclusions et de séparer les champs d'applications de ces différents convertisseurs.

Les onduleurs NPC sont intéressants pour les applications triphasées nécessitant peu de niveaux. L'énergie stockée à l'étage intermédiaire peut être réduite.

Les structures permettant une conversion directe, telles que NPC et cellules imbriquées, sont avantageuses pour les applications avec échange de puissance active, lorsqu'une isolation galvanique n'est pas nécessaire entre les sources échangeant de la puissance.

Les onduleurs à cellules en cascade sont très avantageux pour les applications monophasées sans apport de puissance active. Ils conviennent même pour les très grandes tensions. Ce sont également des structures à privilégier pour les applications où il faut mettre en place une isolation galvanique à l'aide de transformateur moyenne ou haute fréquence.

## **I.6.Conclusion**

La technique des onduleurs multi-niveaux représente un domaine de recherche important. Recherche liée également à des applications toujours plus performantes et plus puissantes. Dans ce chapitre on a présenté la description des principales topologies de la conversion multi-niveaux avec leurs avantages et inconvénients. Ces topologies comprennent principalement la technique des onduleurs NPC à potentiels distribués, la technique dite des cellules imbriquées, ainsi que la technique des convertisseurs cascades.

Les onduleurs NPC sont intéressants pour les applications triphasées nécessitant peu de niveaux. Les deux structures d'onduleurs NPC et à cellule imbriquée sont avantageuses pour les applications avec échange de puissance active. L'onduleur en cascade est avantageux pour les applications monophasées. Il convient même pour les très grandes tensions.

Le convertisseur de tension NPC à N niveaux permet d'obtenir des performances statiques et dynamique très intéressantes par rapport à une structure à deux niveaux et ses applications sont diverses de nos jours.

# Chapitre II

*Modélisation et simulation des onduleurs multi niveaux à commande pleine onde et à commande (MLI).*

## **II.1. Introduction**

L'un des plus grands problèmes dans l'aspect de la qualité de puissance est le contenu harmonique dans les systèmes électriques. Les harmoniques de tension et celles du courant peuvent être générées soit du côté source ou du côté charge, les harmoniques générées par la charge sont causées par l'opération non linéaire des éléments constituant le système, incluant les convertisseurs de puissance ... etc. [20]. Aussi, les harmoniques sont générées principalement par la source avec des formes d'onde de tension non sinusoïdale, ce qui implique des pertes de puissance.

En 1981, les premiers convertisseurs (onduleurs) ont été introduits par A. Nabae et H. Akagi [21] où l'objectif était de réduire l'amplitude des harmoniques injectées par le convertisseur dans la charge.

Dans la suite de ce chapitre, on essaye d'appliquer les convertisseurs multiniveaux dans le domaine PV, où il sera intéressant d'améliorer la qualité de puissance produite par photovoltaïque.

## **II.2. Intérêt des convertisseurs multiniveaux**

### **II.2.1. Les convertisseurs multiniveaux présentent quelques avantages [22] :**

D'une part, les structures multiniveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance : chaque composant, lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension de bus continu que le nombre de niveaux est élevé.

D'autre part, la tension de sortie délivrée par les convertisseurs multiniveaux présente d'intéressantes qualités spectrales. Dans le cas plus précis d'un fonctionnement en MLI, le recours à ce type de convertisseur, associé à une commande judicieuse des composants de puissance permet en outre de supprimer certaines familles de raies harmoniques.

En utilisant les convertisseurs multiniveaux, la fréquence de pulsation de chacun des interrupteurs est plus basse que la fréquence apparente de la tension appliquée à la charge. L'attrait des convertisseurs multiniveaux est toutefois limité par quelques inconvénients : La commande est beaucoup plus complexe et les techniques sont encore peu répandues dans l'industrie [21].

### II.3. Modèle de l'onduleur à deux niveaux

Chaque couple transistor-diode est modélisé par un seul interrupteur bidirectionnel « Si », et vue la symétrie de l'onduleur à deux niveau la modélisation se fait par bras (voir figure II.1). Nous définissons trois variables  $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_c$  qui dépendent des états des commutateurs dans les branches.

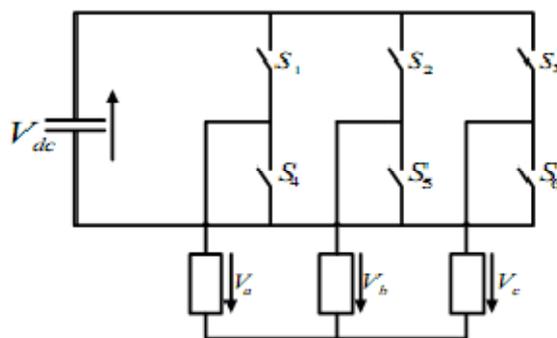


Figure II. 1: Modèle de l'onduleur à deux niveaux

#### Branche1 :

$S_a=0$  Si  $S_1$  est ouvert et  $S_4$  est fermé ;  $S_a=1$  Si  $S_1$  est fermé et  $S_4$  est ouvert.

#### • Branche2 :

$S_b=0$  Si  $S_2$  est ouvert et  $S_5$  est fermé ;  $S_b=1$  Si  $S_2$  est fermé et  $S_5$  est ouvert.

#### Branche3 :

$S_c=0$  Si  $S_3$  est ouvert et  $S_6$  est fermé ;  $S_c=1$  Si  $S_3$  est fermé et  $S_6$  est ouvert.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ V_{bc} = V_{dc}(S_b - S_a) \\ V_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{II-1})$$

#### Branche3 :

$S_c=0$  Si  $S_3$  est ouvert et  $S_6$  est fermé ;  $S_c=1$  Si  $S_3$  est fermé et  $S_6$  est ouvert.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3}(V_{ab} - V_{ca}) \\ V_b = \frac{1}{3}(V_{bc} - V_{cb}) \\ V_c = \frac{1}{3}(V_{ca} - V_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II-2})$$

Après remplacement et mise sous forme matricielle, nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II-3})$$

## II.4. Modélisation de l'onduleur à trois niveaux de type NPC

### II.4.1. Structure de l'onduleur à trois niveaux :

L'idée de base de l'onduleur NPC est l'obtention d'une tension de sortie à trois niveaux par la superposition de deux interrupteurs élémentaires alimentés chacun par une source de tension continue distincte. L'onduleur triphasé à trois niveaux utilisé est constitué de trois bras et de deux sources de tension continue. Chaque bras comporte quatre interrupteurs en série et deux diodes médianes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montée en tête bêche, [23].

Le point milieu de chaque bras est relié à une alimentation continue, de force électromotrice (E). A l'aide d'un diviseur de tension capacitif formé par les condensateurs de filtrage C1 et C2 de même capacité, on obtient deux sources secondaires de tension continue délivrant chacune une demi tension (E/2). Étant connectés entre eux en un point neutre noté o. Ces derniers sont identiques de manière à éviter le déséquilibre de charge (C1=C2 c'est-à-dire Uc1=Uc2).

Le point o est connecté avec les deux diodes médianes (DDK1, DDK2), [24, 25]. La figure (II-2) fournit une représentation schématique de cet onduleur

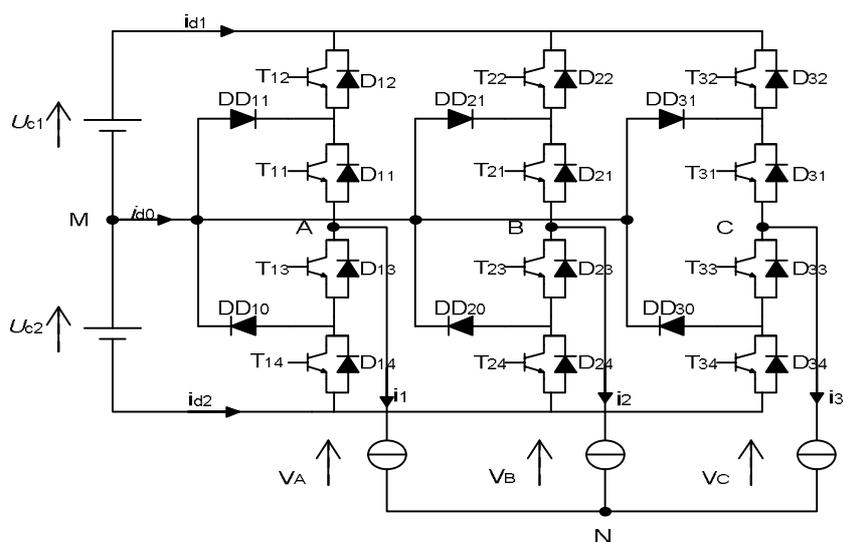
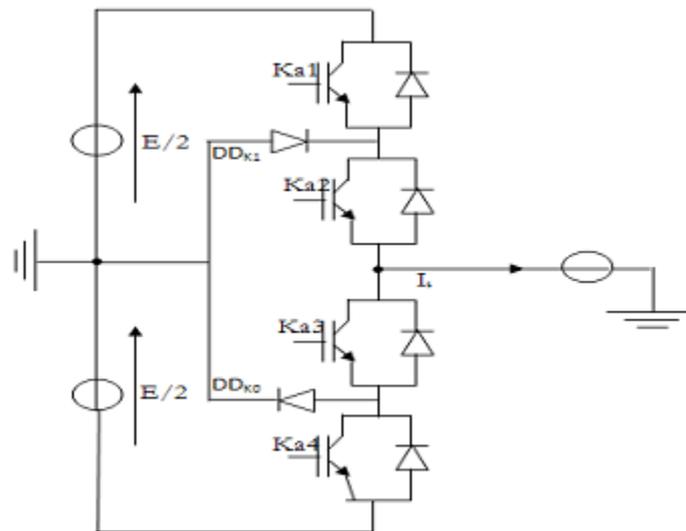


Figure II. 2: Onduleur triphasé à trois niveaux



**Figure II. 3 :** Un bras de l'onduleur à trois niveaux de type NPC

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs dépend de :

- La commande externe BKS (l'ordre d'amorçage ou de blocage du semi-conducteur Bidirectionnel TKS).
- Une commande interne définie par les signes du courant du bras.

Pour éviter la mise en conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un seul bras, qui provoque un court-circuit aux bornes des sources continues et par conséquent le risque de distorsion des condensateurs et des composants semi-conducteurs par surintensité et qui peut engendrer la destruction par surtension des interrupteurs lors d'ouvertures simultanées de ces derniers, on adopte la solution classique suivante :

On doit réaliser une commande complémentaire des différents interrupteurs d'un même bras de l'onduleur, [26].

#### **II.4.2. Configurations et fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux**

Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple  $V_{ao}$  entre la borne (a) de la charge et le point neutre 0. Cette tension est entièrement définie par 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 court-circuit 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 (II-1) représente la tension de sortie  $V_{ao}$  d'un onduleur NPC à trois niveaux en fonction de l'état des interrupteurs, la tension au borne des interrupteurs de puissance n'excède jamais la moitié du bus d'entrée, [25].

A la différence de l'onduleur à deux niveaux, chaque demi-bras de l'onduleur à trois niveaux utilisée non pas un interrupteur bidirectionnel mais deux, ce qui permet d'effectuer une commande décalée, [27]

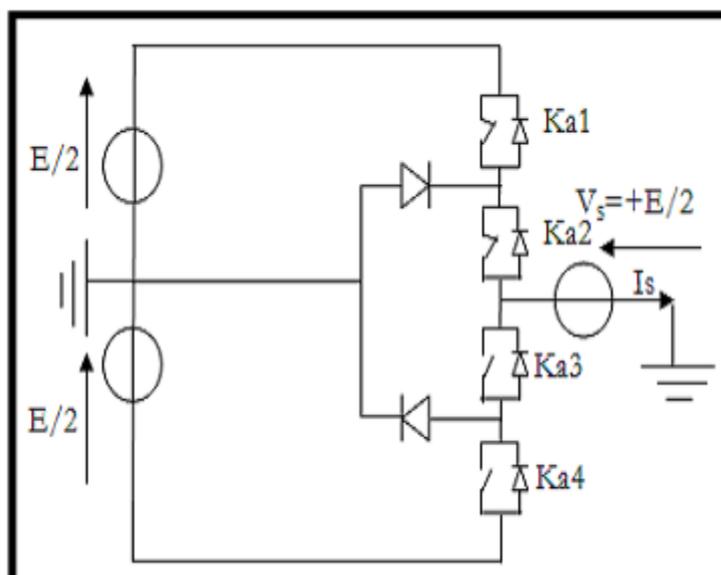
#### **Première configuration {1100}**

$Ka1$ ,  $Ka2$  sont passants et  $Ka3$  et  $Ka4$  sont bloqués (figure (II-4)), la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = +E/2 \quad (II-4)$$

La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka3} = V_{ka4} = +E/2 \quad (II-5)$$



**Figure II. 4 : 1er configuration du 1er bras**

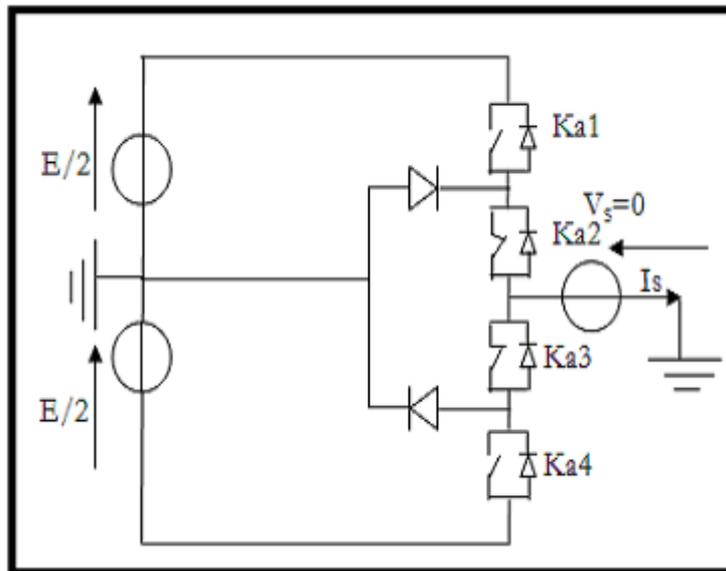
**Deuxième configuration {0110}**

Ka2, Ka3 sont passants et Ka1 et Ka4 sont bloqués (figure (II-5)), le point a est relié directement au point neutre 0. La tension simple  $V_{ao}$  est nulle :

$$V_{ao} = 0 \quad (II-6)$$

La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka4} = +E/2 \quad (II-7)$$



*FigureII. 5 : 2ème configuration du 1er bras*

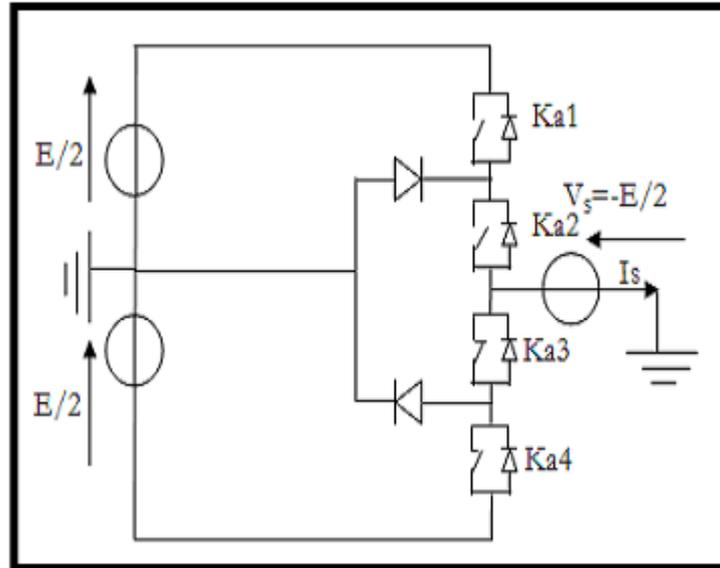
**Troisième configuration {0011}**

Ka3, Ka4 sont passants et Ka1 et Ka2 sont bloqués (figure (II-6)), la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = -E/2 \quad (II-8)$$

La tension inverse aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = +E/2 \quad (II-9)$$



**Figure II. 6 :** 3ème configuration du 1er bras

État des interrupteurs				Tension De sortie Vao
Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	
1	1	0	0	E/2
0	1	1	0	0
0	0	1	1	-E/2

**Tableau II. 1:** Grandeur connue pour chacune des configurations d'un bras

### II.4.3. Modèle de connaissance de l'onduleur à trois niveaux

Un convertisseur est dit en mode commandable si les transitions entre ses différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe (commande des bases des semi-conducteurs) et par suite une conduction continue de ce convertisseur pour l'onduleur à trois niveaux, cette condition de Commandabilité implique que les transitions entre les configurations ne dépendent plus des commandes internes (grandeurs électriques), mais uniquement des commandes des transistors (commande externe). Nous supposons par la suite que cette condition est toujours vérifiée.

Pour un onduleur en mode commandable, on définit la commande complémentaire suivante (voir figure II.3).

$$\begin{cases} B_{k1} = \overline{B_{k4}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k3}} \end{cases} \quad (\text{II-10})$$

Avec :

**B<sub>ks</sub>** : la commande du transistor

**T<sub>ks</sub>** : du bras k

#### II.4.4. Fonctions de connexion des interrupteurs

On définit la fonction de connexion de chaque interrupteur TD<sub>ks</sub> comme étant une fonction qui décrit l'état ouvert ou fermé de celui-ci :

$$\begin{cases} F_{ks}=1 \\ F_{ks}=0 \end{cases} \quad \text{si l'interrupteur TD}_{ks} \text{ est fermé} \quad (\text{II-11})$$

Si non

$$\begin{cases} F_{k1}=1-F_{k4} \\ F_{k2}=1-F_{k3} \end{cases} \quad (\text{II-12})$$

En traduisant la commande complémentaire par les fonctions de connexion des interrupteurs du bras k, on trouve :

#### II.4.5. Fonctions de connexion des demi-bras

Pour l'onduleur à trois niveaux, on définit en plus la fonction de connexion d'un demi-bras notée  $F_{km}^b$ .

Où k= 1 numéro du bras.

$$m = \begin{cases} 0 & \text{pour le demi-bras du bas constitué de } T_{k3} \text{ et } T_{k4} \\ 1 & \text{pour le demi-bras du haut constitué de } T_{k1} \text{ et } T_{k2} \end{cases}$$

Les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1} \cdot F_{k2} \\ F_{k0}^b = F_{k3} \cdot F_{k4} \end{cases} \quad (\text{II-13})$$

**Fonction de conversion**

Les potentiels aux nœuds A, B et C de l'onduleur par rapport au point milieu M s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs et des tensions d'entrée comme suit :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot U_{C1} - F_{13} \cdot F_{14} \cdot U_{C2} \\ V_{BM} = F_{21} \cdot F_{22} \cdot U_{C1} - F_{23} \cdot F_{24} \cdot U_{C2} \\ V_{CM} = F_{31} \cdot F_{32} \cdot U_{C1} - F_{33} \cdot F_{34} \cdot U_{C2} \end{cases} \quad (\text{II-14})$$

En introduisant les fonctions de connexion des demi-bras, on aura :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}^b \cdot U_{C1} - F_{10}^b \cdot U_{C2} \\ V_{BM} = F_{21}^b \cdot U_{C1} - F_{20}^b \cdot U_{C2} \\ V_{CM} = F_{31}^b \cdot U_{C1} - F_{30}^b \cdot U_{C2} \end{cases} \quad (\text{II-15})$$

Les tensions composées s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_{AM} - V_{BM} \\ U_{BC} = V_{BM} - V_{CM} \\ U_{CA} = V_{CM} - V_{AM} \end{cases} \quad (\text{II-16})$$

D'où le système matriciel suivant exprimant ces tensions composées au moyen des fonctions de connexion des demi-bras :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c2} \right\} \quad (\text{II-17})$$

Les tensions simples sont déduites comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c2} \right\} \quad (\text{II-18})$$

**Chapitre II: Modélisation et simulation des onduleurs multi niveaux à commande pleine onde et à commande (MLI).**

---

Les courants d'entrée  $i_{d1}$  et  $i_{d2}$  sont exprimés en fonction des courants de charge  $i_1$ ,  $i_2$  et  $i_3$  par les relations suivantes :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot i_1 + F_{21} \cdot F_{22} \cdot i_2 + F_{31} \cdot F_{32} \cdot i_3 \\ i_{d2} = F_{13} \cdot F_{14} \cdot i_1 + F_{23} \cdot F_{24} \cdot i_2 + F_{33} \cdot F_{34} \cdot i_3 \end{cases} \quad (\text{II-19})$$

D'où :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11}^b \cdot i_1 + F_{21}^b \cdot i_2 + F_{31}^b \cdot i_3 \\ i_{d2} = F_{10}^b \cdot i_1 + F_{20}^b \cdot i_2 + F_{30}^b \cdot i_3 \end{cases} \quad (\text{II-20})$$

Cette relation montre, que pour l'onduleur à trois niveaux, tout se passe comme si le courant  $i_{d1}$  était le courant d'entrée de l'onduleur à deux niveaux du haut, et  $i_{d2}$  le courant d'entrée de l'onduleur à deux niveaux du bas.

Le courant  $i_{d0}$  est lié aux courants de charge comme suit :

$$i_{d0} = F_{11} \cdot F_{13} \cdot i_1 + F_{21} \cdot F_{23} \cdot i_2 + F_{31} \cdot F_{33} \cdot i_3 \quad (\text{II-21})$$

Des relations (II.5) et (II.14), on déduit qu' $i_{d0}$  s'écrit sous la forme :

$$i_{d0} = i_1 + i_2 + i_3 - i_{d1} - i_{d2} \quad (\text{II-22})$$

D'où

$$i_{d0} = (1 - F_{11}^b - F_{10}^b) \cdot i_1 + (1 - F_{21}^b - F_{20}^b) \cdot i_2 + (1 - F_{31}^b - F_{30}^b) \cdot i_3 \quad (\text{II-23})$$

Pour l'onduleur triphasé à trois niveaux, le vecteur des grandeurs d'état est  $[UC1 \ UC2 \ i1 \ i2 \ i3]^T$  et ses entrées internes sont  $[VA \ VB \ VC \ i_{d1} \ i_{d2} \ i_{d0}]^T$

Ou :  $[UAB \ UBC \ UCA \ i_{d1} \ i_{d2} \ i_{d0}]^T$

On définit la matrice de conversion simple qui nous permet de déduire le vecteur des grandeurs internes en fonction du vecteur d'état :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ id1 \\ id2 \\ id0 \end{bmatrix} = [N(t)] \cdot \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II-24})$$

Avec :

$$[N(t)] = \begin{bmatrix} \frac{2F_{11}^b - F_{21}^b - F_{31}^b}{3} & \frac{2F_{10}^b - F_{20}^b - F_{30}^b}{3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-F_{11}^b + 2F_{21}^b - F_{31}^b}{3} & \frac{-F_{10}^b + 2F_{20}^b - F_{30}^b}{3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-F_{11}^b - F_{21}^b + 2F_{31}^b}{3} & \frac{-F_{10}^b - F_{20}^b + 2F_{30}^b}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & (1-F_{11}^b - F_{10}^b) & (1-F_{21}^b - F_{20}^b) & (1-F_{31}^b - F_{30}^b) \end{bmatrix} \quad (\text{II-25})$$

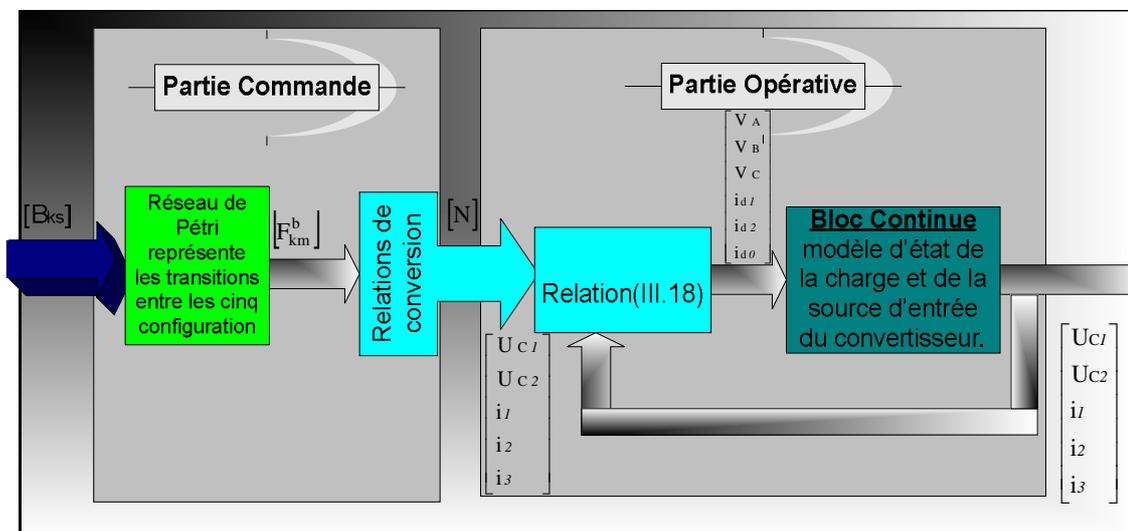
De même, on définit la matrice de conversion composée comme suit :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \\ id1 \\ id2 \\ id0 \end{bmatrix} = [M(t)] \cdot \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II-25})$$

Avec :

$$[M(t)] = \begin{bmatrix} (F_{11}^b - F_{21}^b) & -(F_{10}^b - F_{20}^b) & 0 & 0 & 0 \\ (F_{21}^b - F_{31}^b) & -(F_{20}^b - F_{30}^b) & 0 & 0 & 0 \\ (F_{31}^b - F_{11}^b) & -(F_{30}^b - F_{10}^b) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & (1-F_{11}^b - F_{10}^b) & (1-F_{21}^b - F_{20}^b) & (1-F_{31}^b - F_{30}^b) \end{bmatrix} \quad (\text{II-26})$$

Après avoir défini les matrices de conversion simple et composée respectivement  $[N(t)]$  et  $[M(t)]$ , on peut présenter le modèle de connaissance de l'onduleur triphasé à trois niveaux, en mode totalement commandable comme suit :



**Figure II. 7 :** Modèle de connaissance de l'onduleur triphasé à trois niveaux.

On distingue :

La partie commandable : représentée par les équations qui définissent le fonctionnement de l'onduleur triphasé en mode commandable. Cette partie génère la matrice de conversion.

La partie opérative : constituée d'un bloc continu et d'un bloc discontinu :

- Un bloc discontinu délivrant les entrées internes générées par le convertisseur à partir de ses variables d'état et de la matrice de conversion.
- Un bloc continu représentant le modèle de la charge de l'onduleur et de la source de tension d'entrée.

## **II.5. Onduleur à cinq niveaux de type NPC :**

### **II.5.1. Structure de l'onduleur à cinq niveaux**

L'onduleur triphasé à cinq niveaux étudié est constitué de trois bras et quatre sources de tension continue. Chaque bras comporte huit interrupteurs, plus deux diodes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montés en tête bêche. La figure (II-8) donne une représentation schématique d'un bras de cet onduleur, [28].

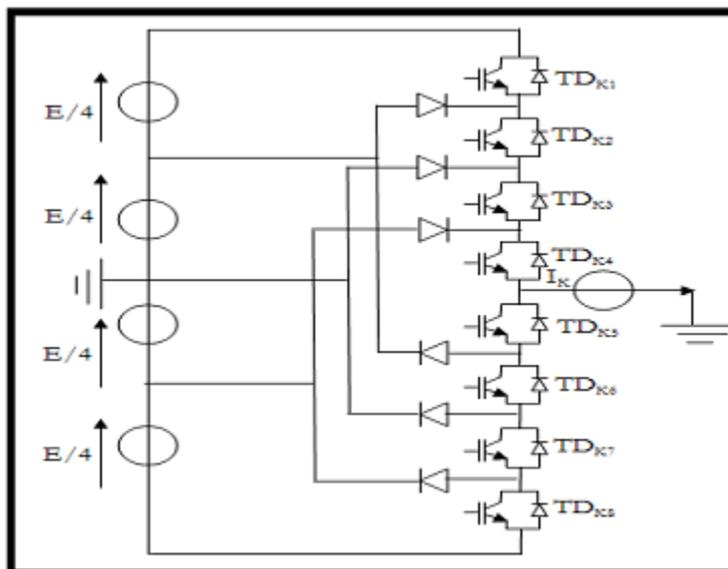


Figure II. 8: Bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux

### II.5.2. Différentes configurations d'un bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux

Une analyse topologique d'un bras montre cinq configurations possibles, pour définir les séquences de fonctionnements de cet onduleur, définissant d'abord les différents états que peut prendre la tension simple (la tension entre le bras de l'onduleur et le point milieu fictif), par exemple. La tension simple  $V_{ao}$  est définie par l'état de huit quadruplet qui peuvent être transistor, un GTO ou bien un IGBT ou autre avec une diode en antiparallèle. Les états possibles d'un seul bras d'interrupteurs est de  $2^5=32$  états que l'on peut représenter par un quadruplet de 0 et 1. Seules les cinq états suivantes sont possibles, [28]

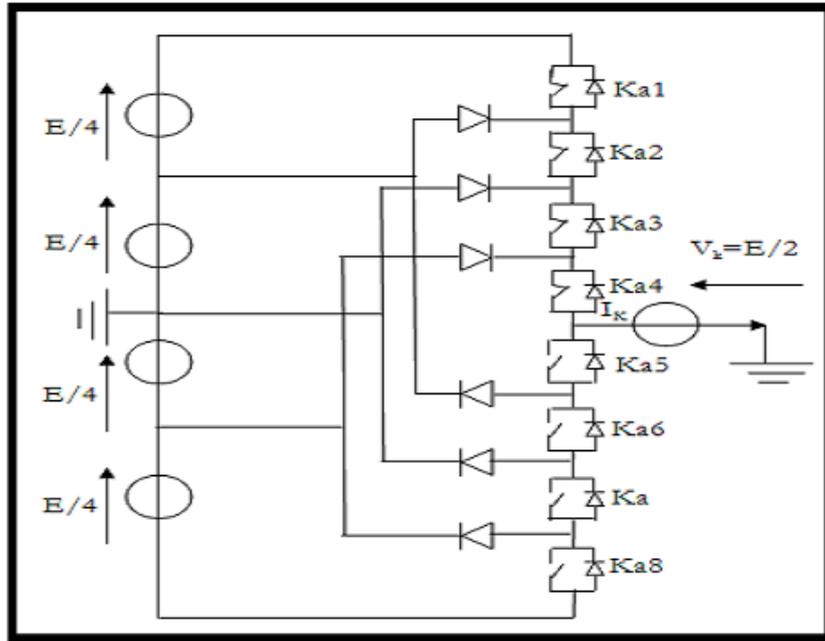
#### *Première configuration {11110000}*

$Ka_1, Ka_2, Ka_3$  et  $Ka_4$  sont passants et  $Ka_5, Ka_6, Ka_7$  et  $Ka_8$  sont bloqués (figure II-9)), la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = +E/2 \quad (II-27)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka5} = V_{ka6} = V_{ka7} = V_{ka8} = +E/4 \quad (II-28)$$



**FigureII. 9 :** 1ère configuration du 1er bras

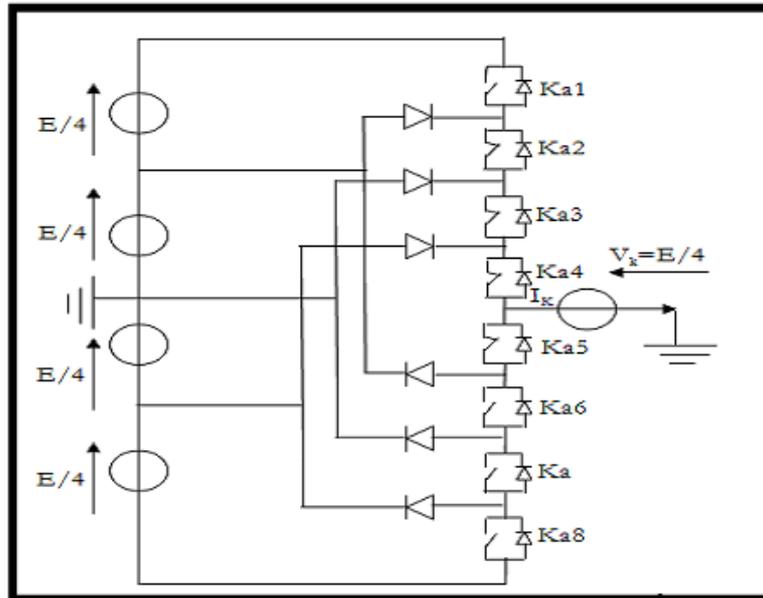
**Deuxième configuration {01111000}**

$Ka2, Ka3, Ka4$  et  $Ka5$  sont passants et  $Ka6, Ka7, Ka8$  et  $Ka1$  sont bloqués (figure II-10), la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = +E/4 \quad (II-29)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka6} = V_{ka7} = V_{ka8} = +E/4 \quad (II-30)$$



*FigureII. 10 : 2ème configuration du 1er bras*

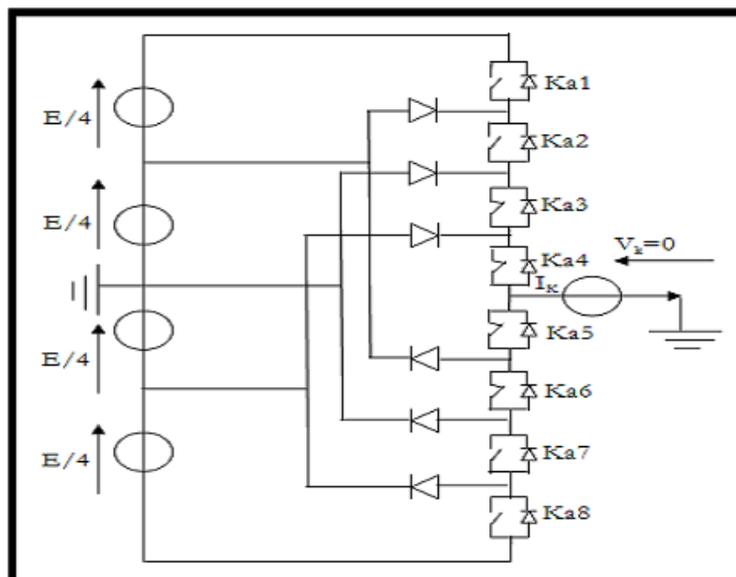
**Troisième configuration {00111100}**

Ka3, Ka4, Ka5 et Ka6 sont passants et Ka7, Ka8, Ka1 et Ka2 sont bloqués (figure II-11)), la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = 0 \quad (II-31)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka7} = V_{ka8} = +E/4 \quad (II-32)$$



*FigureII. 11: 3ème configuration du 1er bras*

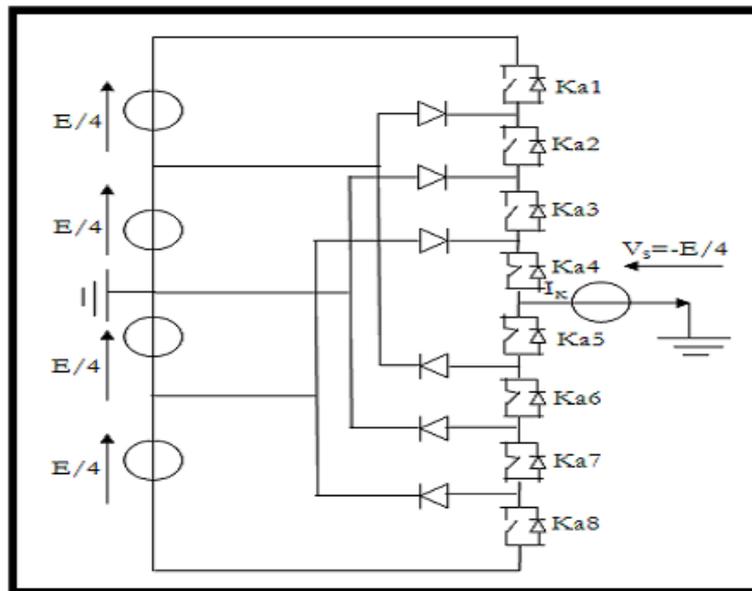
**Quatrième configuration {00011110}**

Ka4, Ka5, Ka6 et Ka7 sont passants et Ka8, Ka1, Ka2 et Ka3 sont bloqués (figure II-12)), la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = - E/4 \quad (II-33)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka3} = V_{ka8} = +E/4 \quad (II-34)$$



FigureII. 12: 4ème configuration du 1er bras

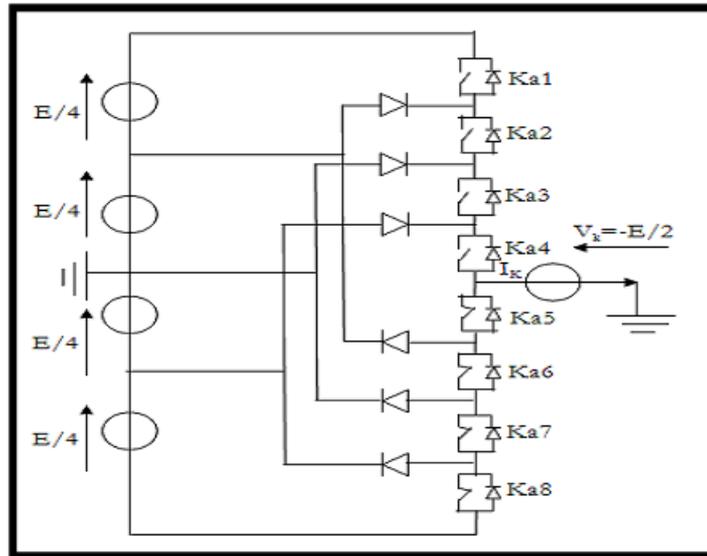
**Cinquième configuration {00001111}**

Ka5, Ka6, Ka7 et Ka8 sont passants et Ka1, Ka2, Ka3 et Ka4 sont bloqués (figure II-13)), la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = - E/2 \quad (II-35)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka3} = V_{ka4} = +E/4 \quad (II-36)$$



**Figure II. 13:** 5ème configuration du 1er bras

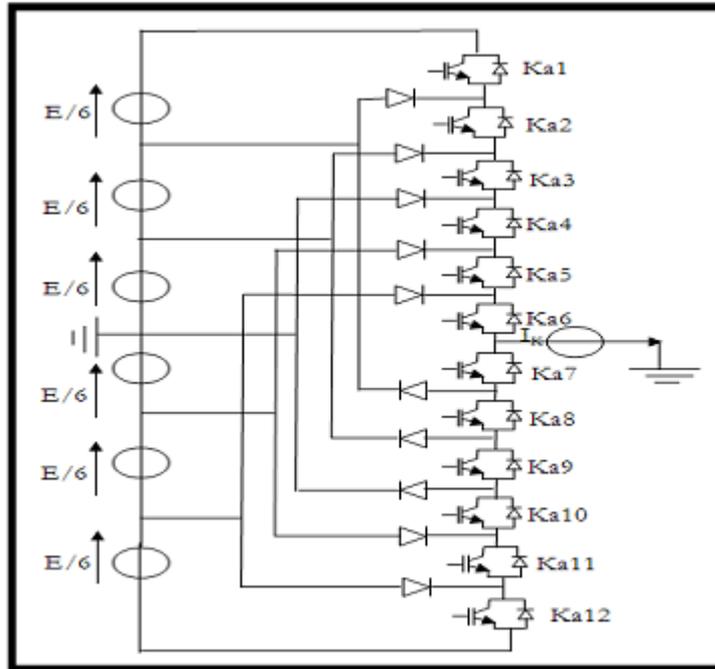
Etat des interrupteurs								Tension De sortie $V_{ao}$
Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	Ka5	Ka6	Ka7	Ka8	
1	1	1	1	0	0	0	0	$E/2$
0	1	1	1	1	0	0	0	$E/4$
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	$-E/4$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-E/2$

**Tableau II. 2:** Table de commutation de l'onduleur NPC à 5 niveaux

## II.6. Onduleur à sept niveaux de type NPC

### II.6.1. Structure de l'onduleur à sept niveaux

L'onduleur triphasé à sept niveaux à structure NPC étudié dans ce paragraphe, est constitué de trois bras symétrique et six sources de tension continue  $E/6$ . Chaque bras comporte douze interrupteurs en série, plus deux diodes pour la mise à zéro du bras de l'onduleur, [28]. Chaque interrupteur est composé d'un IGBT et une diode montés en tête bêche. La figure (II-14) donne une représentation schématique d'un bras de cet onduleur.



**FigureII. 14:** Bras d'un onduleur NPC à sept niveaux

### II.6.2. Différentes configurations d'un bras de l'onduleur NPC à sept niveaux

Une analyse topologique d'un bras de l'onduleur montre sept configurations possibles pour ce dernier. Ces différentes configurations sont représentées par les figures suivantes, [29] :

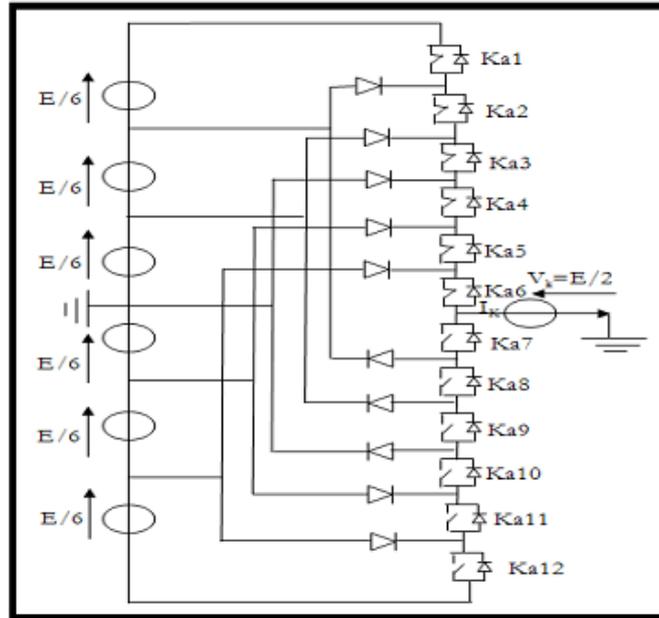
#### **Première configuration {111111000000}**

Ka1, Ka2, Ka3, Ka4, Ka5 et Ka6 sont passants et Ka7, Ka8, Ka9, Ka10, Ka11 et Ka12 sont bloqués (figure II-15)), la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = +E/2 \quad (II-37)$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka7} = V_{ka8} = V_{ka9} = V_{ka10} = V_{ka11} = V_{ka12} = +E/6 \quad (II-38)$$



**Figure II. 15:** 1ère configuration du 1er bras

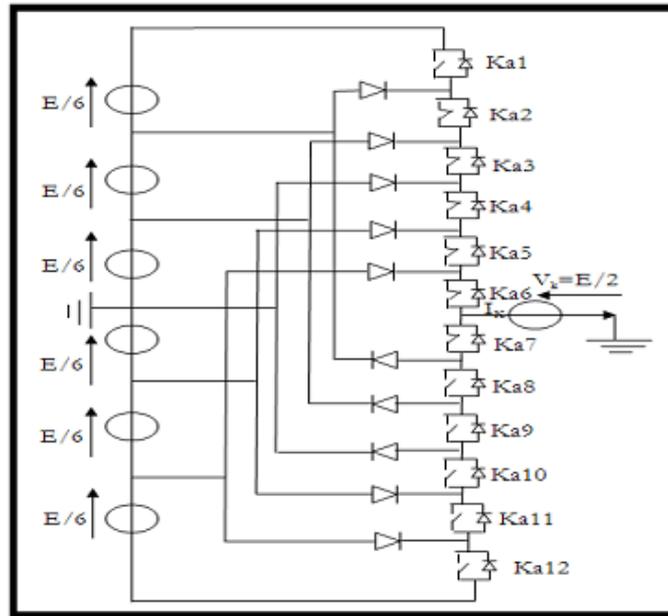
**Deuxième configuration {011111100000}**

Ka2, Ka3, Ka4, Ka5, Ka6 et Ka7 sont passants et Ka8, Ka9, Ka10, Ka11, Ka12 et Ka1 sont bloqués (figure II-16)), la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = +E/3 \tag{II-39}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka8} = V_{ka9} = V_{ka10} = V_{ka11} = V_{ka12} = +E/6 \tag{II-40}$$



**FigureII. 16:** 2ème configuration du 1er bras

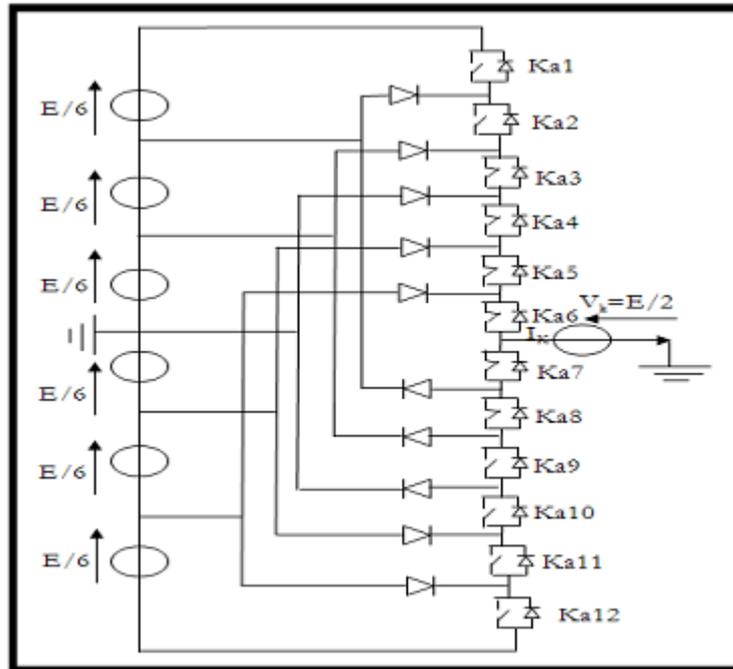
**Troisième configuration {001111110000}**

Ka3, Ka4, Ka5, Ka6, Ka7 et Ka8 sont passants et Ka9, Ka10, Ka11, Ka12 et Ka1 et Ka2 sont bloqués (figure II-17)), la valeur de tension simple Vao est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = +E/6 \tag{II-40}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka9} = V_{ka10} = V_{ka11} = V_{ka12} = +E/6 \tag{II-41}$$



*Figure II. 17: 3ème configuration du 1er bras*

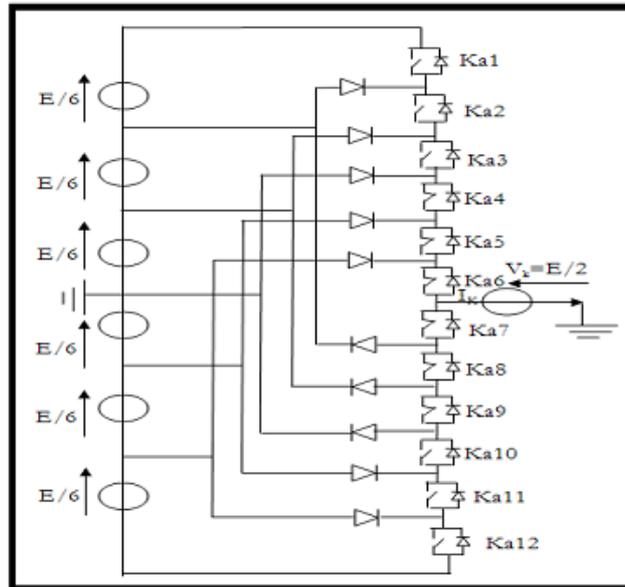
**Quatrième configuration {000111111000}**

Ka4, Ka5, Ka6, Ka7, Ka8 et Ka9 sont passants et Ka10, Ka11, Ka12 et Ka1, Ka2 et Ka3 sont bloqués (figure II-18)), la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = 0 \tag{II-42}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka3} = V_{ka4} = V_{ka11} = V_{ka12} = +E/6 \tag{II-43}$$



**Figure II. 18:** 4ème configuration du 1er bras

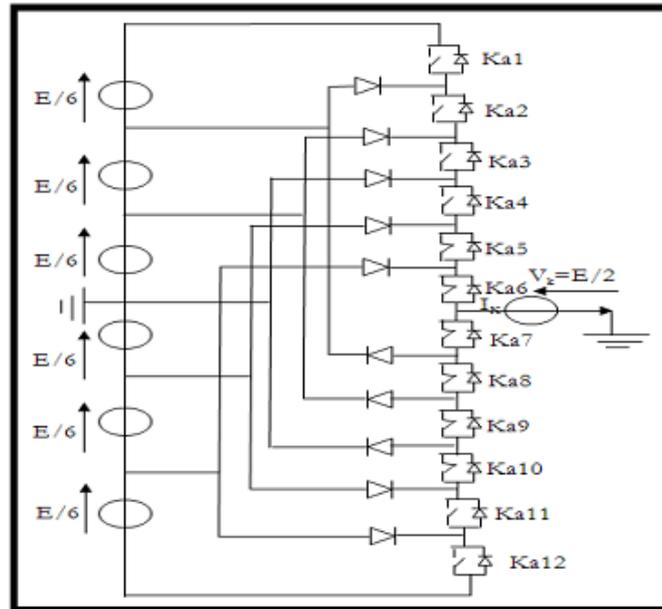
**Cinquième configuration {000011111100}**

Ka5, Ka6, Ka7, Ka8, Ka9 et Ka10 sont passants et Ka11, Ka12, Ka1, Ka2, Ka3 et Ka4 sont bloqués (figure II-19)), la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = - E/6 \tag{II-44}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka3} = V_{ka4} = V_{ka11} = V_{ka12} = +E/6 \tag{II-45}$$



*FigureII. 19: 5ème configuration du 1er bras*

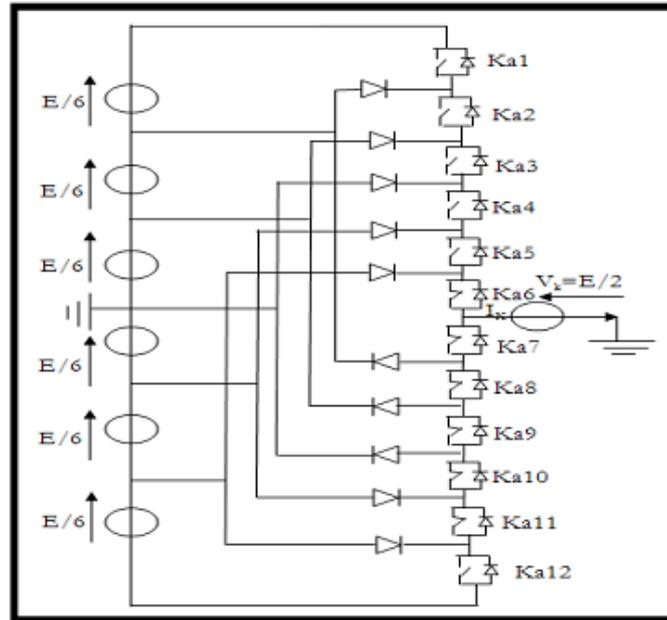
**Sixième configuration {000001111110}**

Ka6, Ka7, Ka8, Ka9, Ka10 et Ka11 sont passants et Ka12, Ka1, Ka2, Ka3, Ka4 et Ka5 sont bloqués (figure II-20)), la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = - E/3 \tag{II-46}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka3} = V_{ka4} = V_{ka5} = V_{ka12} = +E/6 \tag{II-47}$$



**Figure II. 20:** 6ème configuration du 1er bras

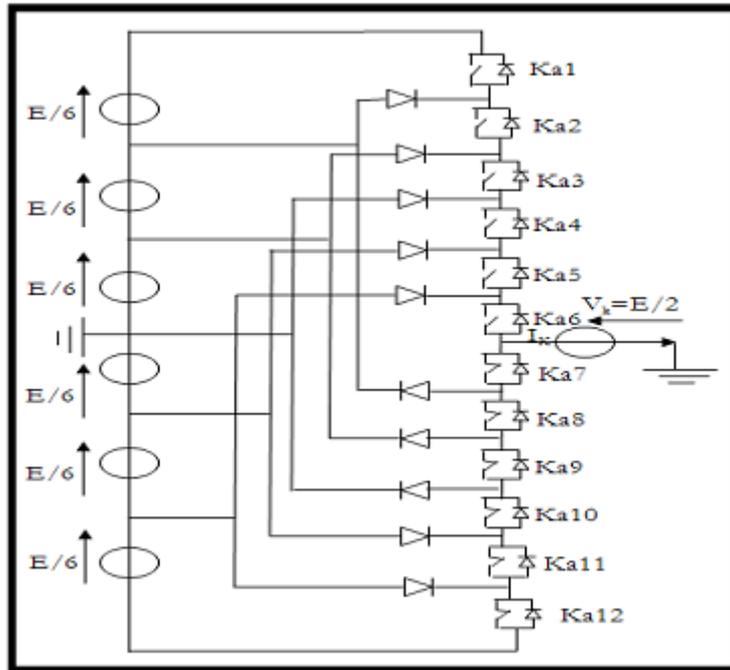
**Septième configuration {000000111111}**

Ka7, Ka8, Ka9, Ka10, Ka11 et Ka12 sont passants et Ka1, Ka2, Ka3, Ka4, Ka5 et Ka6 sont bloqués (figure II-21)), la valeur de tension simple  $V_{ao}$  est donnée par l'équation suivante :

$$V_{ao} = - E/2 \tag{II-48}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{ka1} = V_{ka2} = V_{ka3} = V_{ka4} = V_{ka5} = V_{ka6} = +E/6 \tag{II-49}$$



**Figure II. 21:** 7ème configuration du 1er bras

Etat des interrupteurs												Tension de sortie $V_{ao}$
Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	Ka5	Ka6	Ka7	Ka8	Ka9	Ka10	Ka11	Ka12	
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	$E/2$
0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	$E/3$
0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	$E/6$
0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	$-E/6$
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	$-E/3$
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	$-E/2$

**Tableau II. 3:** Table de commutation de l'onduleur NPC à sept niveaux

### II.7. Commande de l'onduleur par modulation de largeur d'impulsions MLI

Cette technique de commande utilise les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire bipolaire. L'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance sont commandées par le signal résultant de la comparaison de ces deux signaux.

Deux paramètres caractérisent cette technique :

L'indice de modulation  $m = \frac{f_p}{f}$  avec  $f_p$  fréquence de la porteuse et  $f$  la fréquence de la tension de référence.

Le Taux de modulation  $r = \frac{V_{ref}}{U_p}$  avec  $V_{ref}$  l'amplitude de la tension de référence et  $U_p$  l'amplitude de la porteuse.

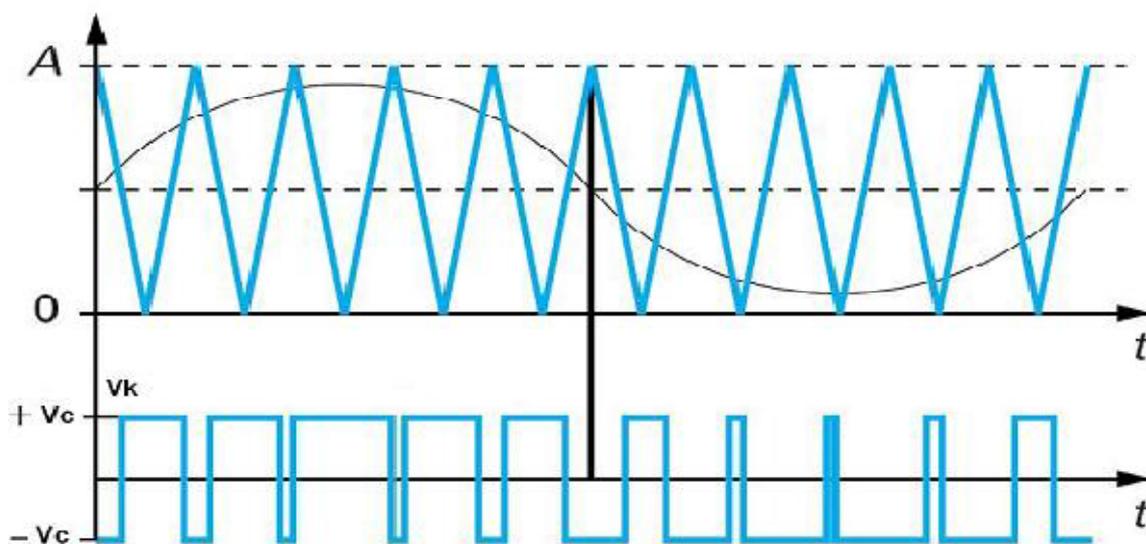
Nous pouvons résumer l'algorithme de commande de la stratégie triangulo-sinusoidale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras k en 2 étapes : [30 31 32]

**Etape 1 :**

$$\begin{cases} V_{refK} \geq U_p \Rightarrow V_k = V_{dc} \\ V_{refK} < U_p \Rightarrow V_k = -V_{dc} \end{cases} \quad (II-50)$$

**Etape 2 :**

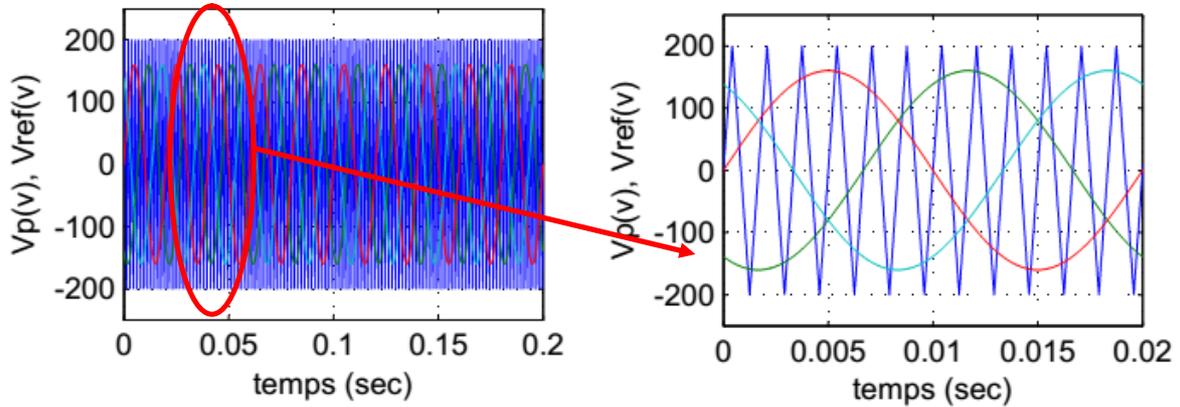
$$\begin{cases} V_k \geq U_p \Rightarrow S_k = 1 \\ V_k < -V_{dc} \Rightarrow S_k = 0 \end{cases} \quad (II-51)$$



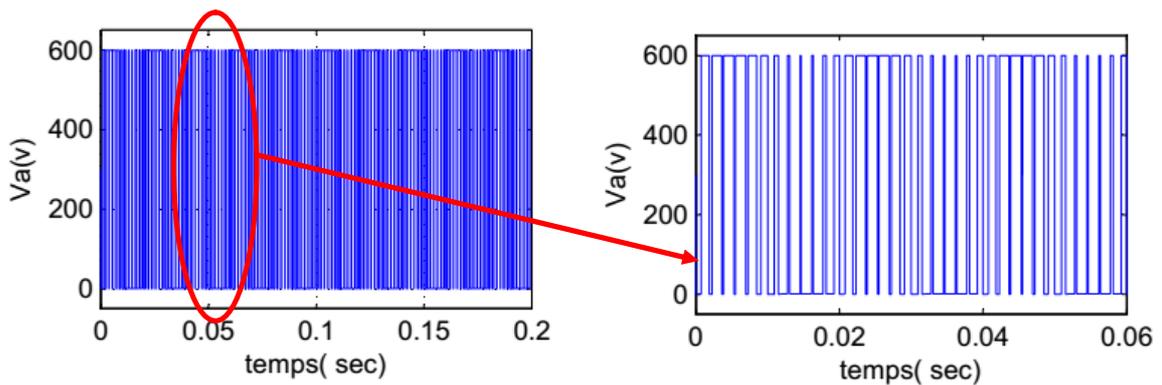
**FigureII. 22:** Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulo-sinusoidale à une porteuse

**II.8.Simulation :**

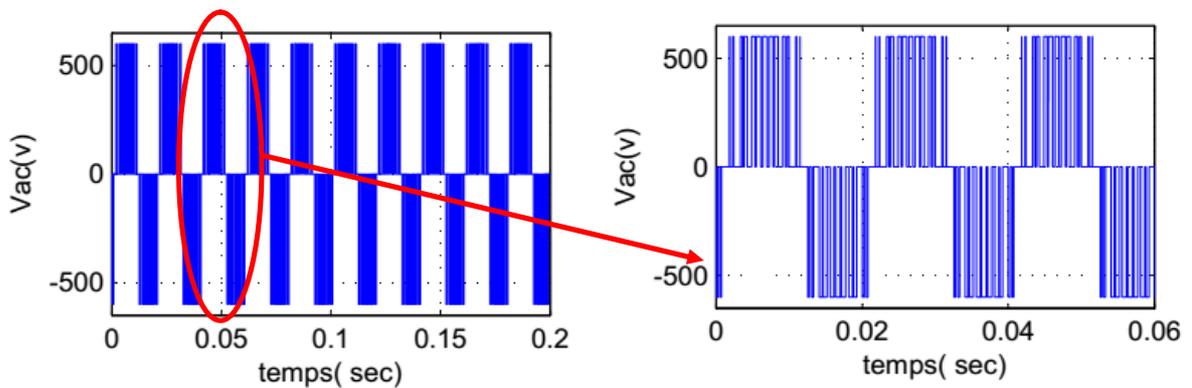
II.8.1.Onduleur deux niveaux :



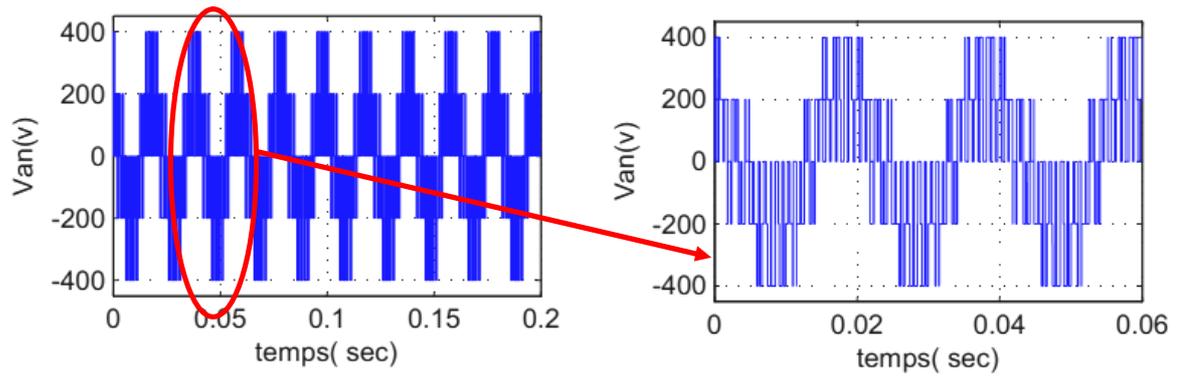
*Figure II. 23: La tension  $V_p$  et  $V_{ref}$  avec  $m=12$  et  $r=0.8$*



*Figure II. 24: La tension simple  $V_{ao}$  onduleur deux niveaux par MLI sinus triangulaire*

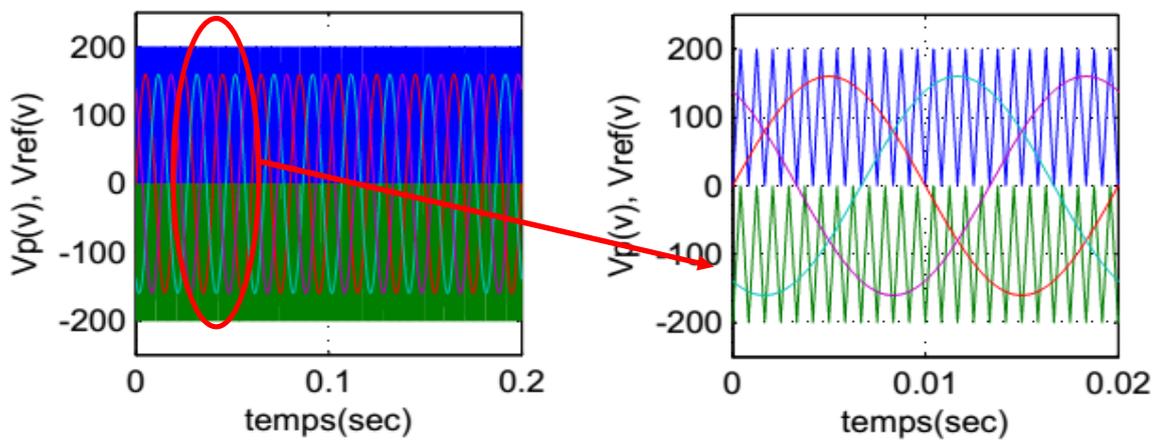


*Figure II.25: La tension composée  $V_{ac}$  onduleur deux niveaux par MLI sinus triangulaire*

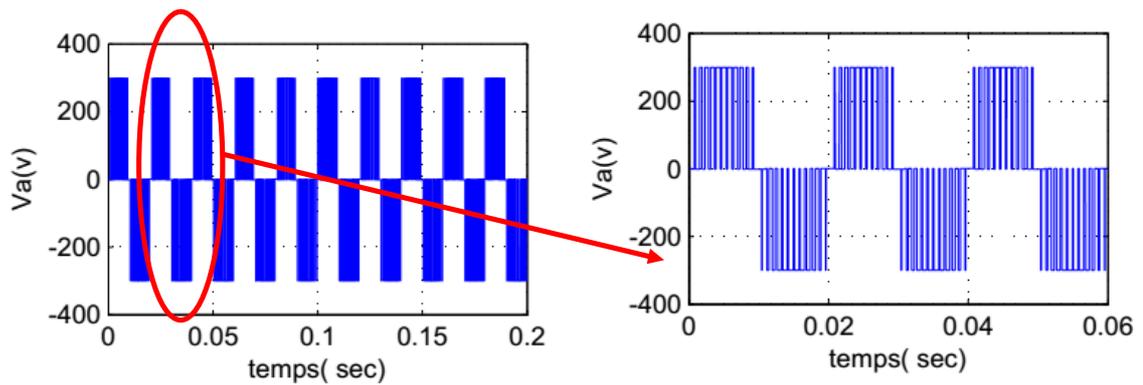


*FigureII. 26: La tension Van onduleur deux niveaux par MLI sinus triangulaire*

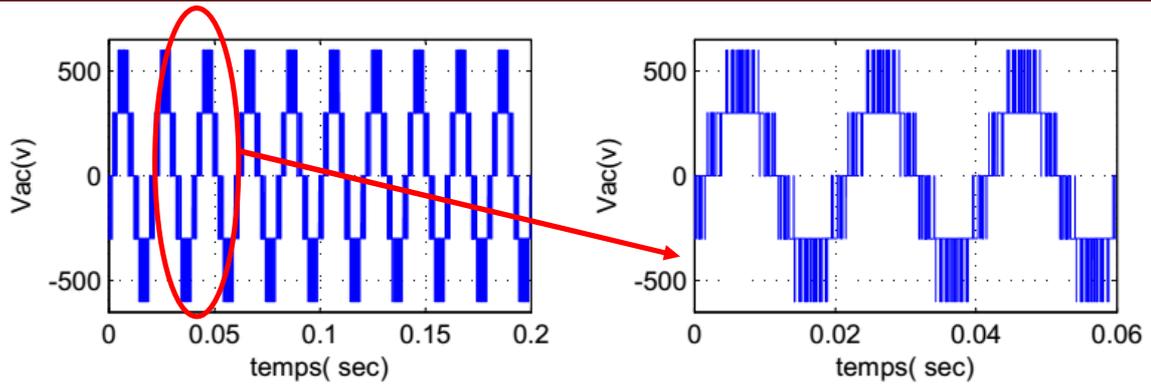
**II.8.2. Onduleur trois niveaux :**



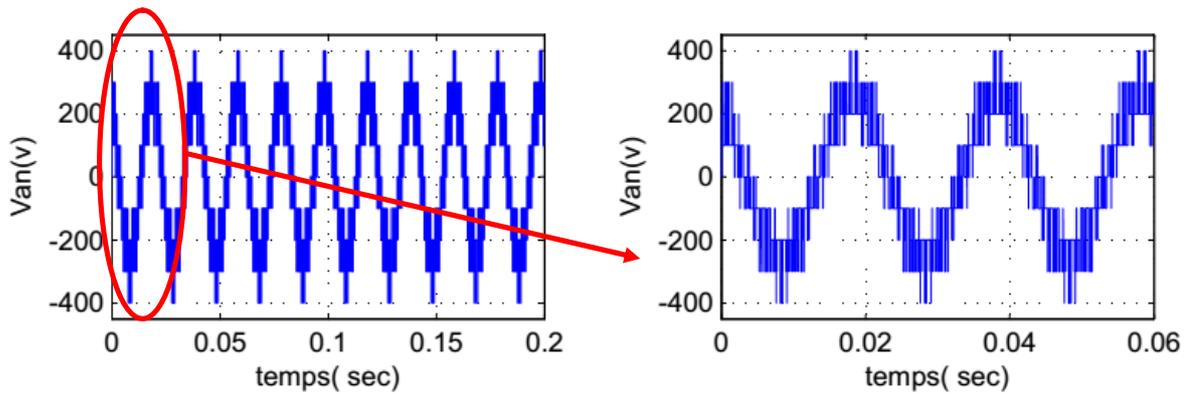
*FigureII. 27: La tension Vp et V réf avec m=12 et r=0.8*



*FigureII. 28: La tension simple Vao onduleur trois niveaux par MLI sinus triangulaire*

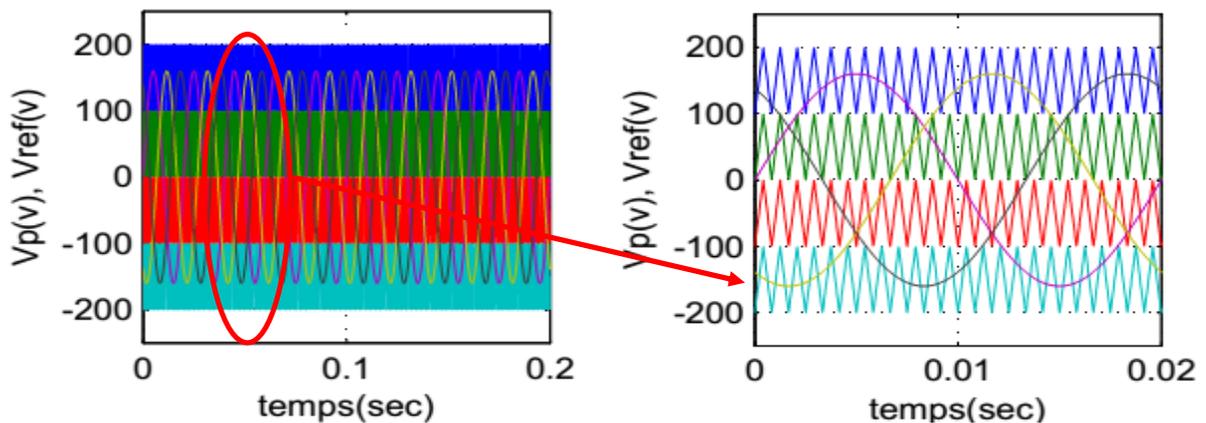


*Figure II.29: La tension composée  $V_{ac}$  onduleur trois niveaux par MLI sinus triangulaire*

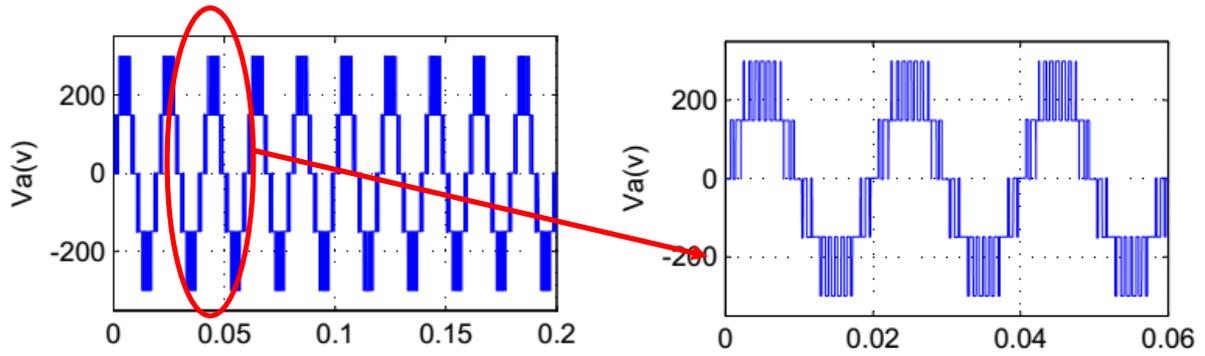


*Figure II. 30: La tension  $V_{an}$  onduleur trois niveaux par MLI sinus triangulaire*

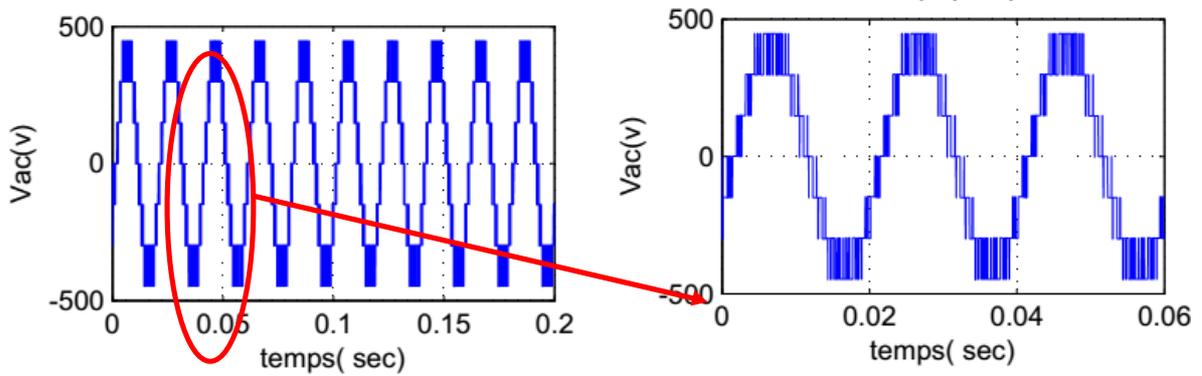
**II.8.3. Onduleur cinq niveaux :**



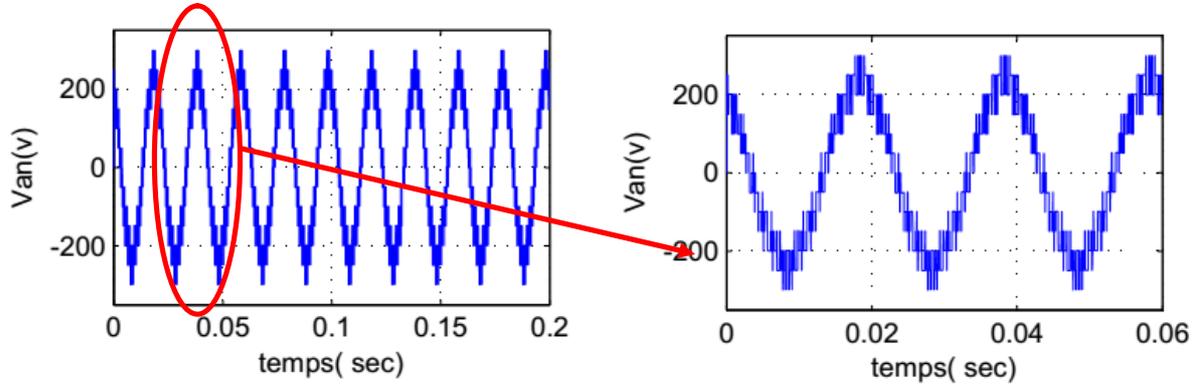
*Figure II. 31: La tension  $V_p$  et  $V_{ref}$  avec  $m=12$  et  $r=0.8$*



*FigureII. 32: La tension simple  $V_{ao}$  onduleur cinq niveaux par MLI sinus triangulaire*

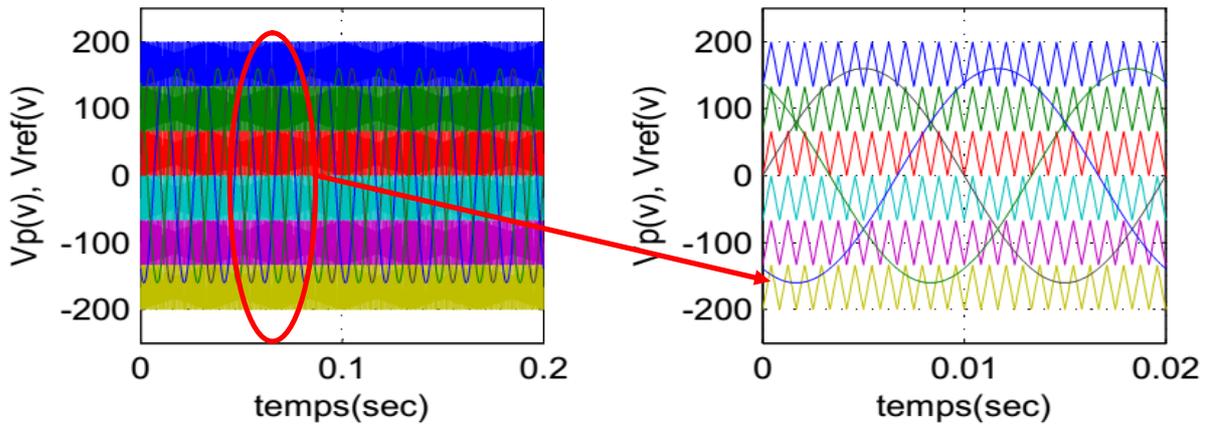


*FigureII. 33: La tension composée  $V_{ac}$  onduleur Cinq niveaux par MLI sinus triangulaire*

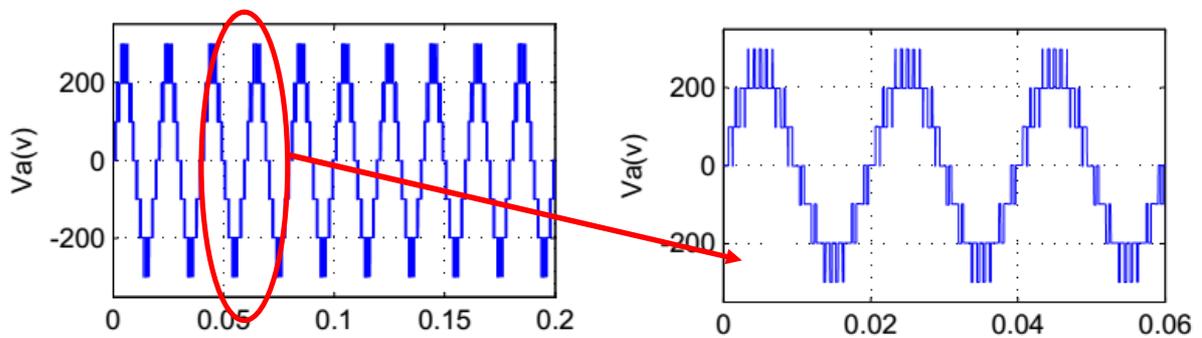


*FigureII. 34: La tension  $V_{an}$  onduleur Cinq niveaux par MLI sinus triangulaire*

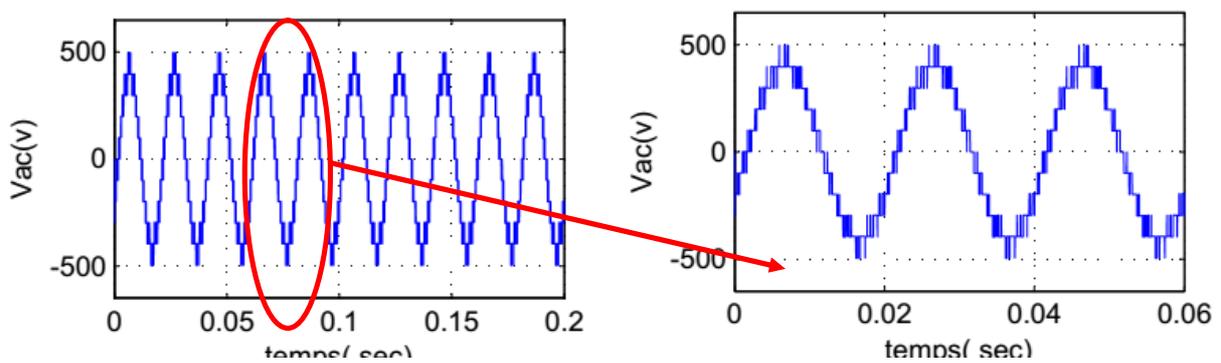
**II.8.4. Onduleur sept niveaux :**



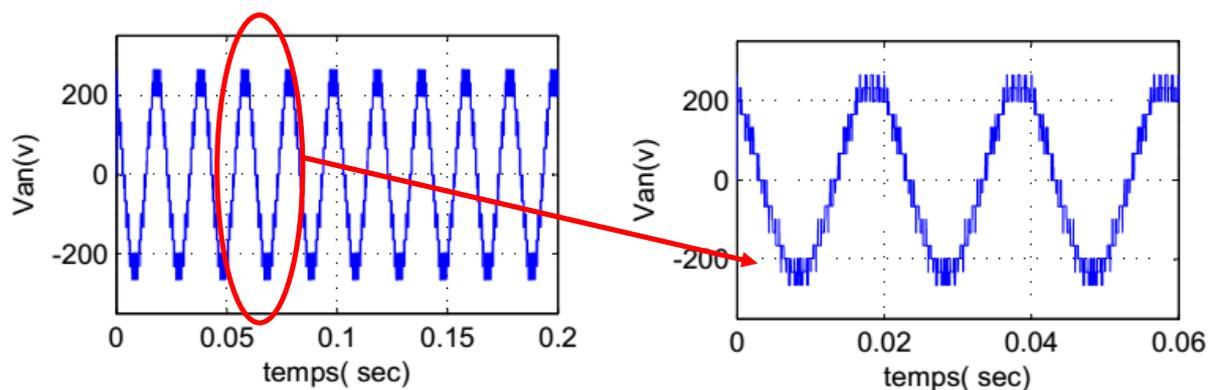
*FigureII. 35: La tension  $V_p$  et  $V_{ref}$  avec  $m=12$  et  $r=0.8$*



*FigureII. 36: La tension simple  $V_{ao}$  onduleur sept niveaux par MLI sinus triangulaire*



*FigureII. 37: La tension composée  $V_{ac}$  onduleur sept niveaux par MLI sinus triangulaire*



*FigureII. 38: La tension Van onduleur sept niveaux par MLI sinus triangulaire*

## II.9. Conclusion

La technique des onduleurs multi-niveaux représente un domaine de recherche important. Recherche liée également à des applications toujours plus performantes et plus puissantes. Dans ce chapitre on a présenté la description des principales topologies de la conversion multi-niveaux avec leurs avantages et inconvénients. Ces topologies comprennent principalement la technique des onduleurs NPC à potentiels distribués, la technique dite des cellules imbriquées, ainsi que la technique des convertisseurs cascades.

Les onduleurs NPC sont intéressants pour les applications triphasées nécessitant peu de niveaux. Les deux structures d'onduleurs NPC et à cellule imbriquée sont avantageuses pour les applications avec échange de puissance active. L'onduleur en cascade est avantageux pour les applications monophasées. Il convient même pour les très grandes tensions.

Le convertisseur de tension NPC à N niveaux permet d'obtenir des performances statiques et dynamique très intéressantes par rapport à une structure à deux niveaux et ses applications sont diverses de nos jours.

Dans le troisième chapitre on présentera une nouvelle structure d'onduleur de tension à trois niveaux à diode de bouclage (NPC), ainsi que leur principe de fonctionnement et l'étude de son modèle mathématique en mode commandable.

# Chapitre III

*Description générale sur les gisements solaire et la production de l'énergie par le photovoltaïque.*

### **III.1. Introduction :**

Cette première partie résume les concepts de base de l'énergie solaire et de la production d'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les principaux éléments du système photovoltaïque sont étudiés et un aperçu générale sur les différents types des systèmes photovoltaïques est effectué. Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec la génératrice photovoltaïque. Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT).

Certains dispositifs utilisent l'énergie alternative pour être alimentés par un générateur photovoltaïque. Il faut utiliser un convertisseur DC-AC, il y a plusieurs commandes et le but de ces commandes c'est d'avoir un signal sinusoïdale.

Dans ce chapitre on va étudier quelques types des convertisseurs DC-DC et DC-AC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques ainsi, on décrit la commande MPPT des convertisseurs DC-DC et la commande MLI des convertisseurs DC-AC.

### **III.2. L'énergie solaire :**

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré ( $kWc/m^2$ ) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire produite et utilisée selon plusieurs procédés:

L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

L'énergie solaire photovoltaïque : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [4].

### III.3. Principes de calcul de l'énergie solaire :

Avant d'entrer dans le calcul de l'irradiation solaire, certains principes de base et définitions méritent d'être rappelés, notamment plusieurs variables qui seront mentionnées à plusieurs reprises par la suite.

#### III.3.1. La latitude ( $\psi$ ):

C'est l'angle formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu considéré, au centre de la terre. Les latitudes de l'hémisphère Nord sont affectées d'un signe positif et celles de l'hémisphère Sud d'un signe négatif [5].

#### III.3.2. La longitude ( $l$ ):

Représente l'angle formé par le plan méridien de lieu considéré et le plan méridien origine. Ce dernier passe par l'observatoire de Greenwich et a pour longitude 0. Les longitudes situées à l'est de ce méridien sont positives et celles situées à l'Ouest négatives [5].

#### III.3.3. L'altitude:

L'altitude est l'élévation d'un lieu par rapport au niveau de la mer, mesurée en mètre (m).

#### III.3.4. La déclinaison ( $\delta$ ):

C'est l'angle entre la direction du soleil et le plan équatorial Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. La déclinaison varie entre  $-23.45^\circ$  (le 21 décembre) et  $+23.45^\circ$  (le 21 juin) . Cet angle varie très peu pendant une journée, ce qui permet d'approcher le mouvement quotidien du soleil par une rotation sur cône d'axe l'équateur [5], [6].

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284 + n}{365}\right) \quad (\text{III.1})$$

Où : n est le numéro de jour dans l'année.

#### III.3.5. Le temps solaire vrai (TSV):

Défini par l'angle horaire  $\rho$  entre le plan méridien passant par le centre du Soleil et le méridien du lieu considéré. Il est compté de 0 à 24h à partir du midi vrai lorsque le Soleil culmine en un lieu donné [7].

La vitesse de la Terre sur sa trajectoire étant soumise à des variations, le jour solaire vrai n'est pas constant. Ainsi, un temps solaire moyen a été retenu comme unité de temps, le jour solaire moyen est défini [7].

$$TSV = 12 + \frac{\rho}{15} \quad (III.2)$$

### III.3.6. La durée et le taux d'insolation :

Par ciel clair et pendant la durée de jour d'ensoleillement  $S_0$  (de lever au coucher du soleil), le sol reçoit le rayonnement solaire maximal. Mais la durée effective d'ensoleillement  $S$  d'une journée ordinaire est inférieure à cette durée maximale [6].

Le taux d'insolation est donné par l'expression :

$$\sigma = \frac{S}{S_0} \quad (III.3)$$

La durée maximale  $S_0$  est calculée par l'expression suivante [7] :

$$S_0 = \left(\frac{2}{15}\right) \cos^{-1}(-\tan \psi \cdot \tan \delta) \quad (III.4)$$

Avec :  $\delta$  : La déclinaison

$\psi$  : La latitude du lieu

### III.3.7. L'angle horaire:

C'est l'angle formé entre le plan méridien passant par le soleil et le plan méridien du lieu obtenu par le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire, dans sa course d'est en Ouest, par rapport au méridien local. La valeur de l'angle est nulle à midi solaire, négative le matin, positive en après-midi et augmente de  $15^\circ$  par heure (donc un tour de  $360^\circ$  en 24 heures) [6].

### III.3.8. Position du soleil:

La direction du soleil dans le ciel est repérée par l'intermédiaire de deux angles :

La hauteur angulaire ( $h$ ) : Qui détermine la longueur de la traversée de la l'atmosphère est l'angle formé par la direction de soleil et le plan horizontal. Sa valeur sera comprise entre 00 (au lever et au coucher) et maximum au zénith (midi en temps solaire vrai) [5], [6].

### Chapitre III: Description générale sur les gisements solaire et la production de l'énergie par le photovoltaïque.

Quand le sinus est négatif, c'est que le soleil n'est pas encore levé (la durée des journées varie dans l'année). Il faut donc écrêter cette variable

$$\sin(h) = \sin(\psi)\sin(\rho) + \cos(\psi)\cos(\rho)\cos(\delta) \quad (\text{III.5})$$

L'angle horaire  $\rho_s$  au lever de soleil s'obtient en écrivant  $\sin(h) = 0$  :

$$\cos(\rho_s) = -\tan(\psi)\tan(\delta) \quad (\text{III.6})$$

Où ( $\delta$ ) la déclinaison calculée d'après l'équation (III.1) et ( $\psi$ ) la latitude du lieu.

- Azimut du soleil ( $\beta$ ) : Angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. Cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest [5], [6].

$$\sin(\beta) = \frac{\cos(\delta)\sin(\rho)}{\cos(h)} \quad (\text{III.7})$$

Ces deux angles sont représentés sur la figure (III.2).

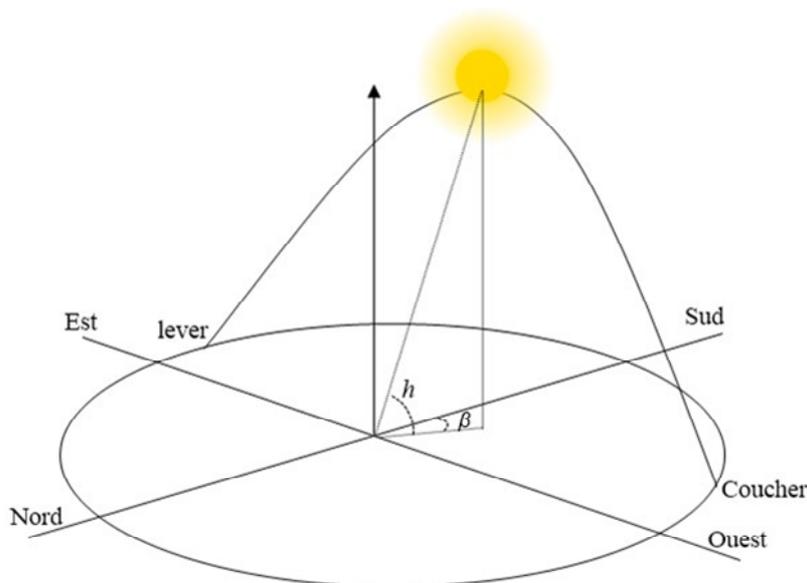


Figure III. 1: Position du soleil.

Pour le site de Ouargla, les spécifications sont données par les grandeurs météorologiques suivantes [6]:

- La latitude :31N
- La longitude : 5°24'E
- L'altitude :141m
- Albédo : 0.35

#### **III.4. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire :**

Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise [5]. Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons, il est nécessaire d'introduire une notion de masse d'air (AM) elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct. La masse d'air est exprimée un multiple du trajet parcouru en un point au niveau de la mer, le soleil étant directement à l'aplomb [8].

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales :

##### **III.4.1. Rayonnement direct:**

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère. [9].

##### **III.4.2. Rayonnement diffuse :**

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère. [9].

##### **III.4.3. Rayonnement réfléchi:**

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo ( $\varepsilon$ )  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ [5].

##### **III.4.4. Rayonnement global:**

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi

#### **III.5. Terminologie « photovoltaïque » - les dates importantes :**

Le terme « photovoltaïque » vient du grec « phos, photo » qui désigne la lumière et de « voltaïque », mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité. Une cellule photovoltaïque est donc une machine à produire de l'électricité sans mouvement circulaire, sans vapeur d'eau sous pression, sans turbine, sans refroidissement (sauf dans le cas des systèmes à concentration). Dès qu'elle est éclairée par de la lumière, elle se met à fonctionner. Le Tableau 1 résume les événements importants de l'histoire du photovoltaïque [10].

**Chapitre III:** Description générale sur les gisements solaire et la production de l'énergie par le photovoltaïque.

1839	Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque
1883	Fritts réalise des cellules solaires de grande surface à base de Se
1954	Des rendements de 6% sont obtenus : Si (Bell Lab, USA) and Cu <sub>2</sub> S/CdS (Air Force, USA)
1955	Hoffman électroniques (USA) propose des cellules Si à 2 % de rendement à \$1500/W
1958	Kearns et Calvin ont démontré l'effet photovoltaïque d'une cellule à base de MgPh
1970	Première cellule solaire à hétérostructures GaAs élaborée par Alferov, Andree et al. en URSS
1973	Première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université Delaware, USA ; à base de Cu <sub>2</sub> S
1980	La première cellule à base de Cu <sub>2</sub> S/CdS délivrant un rendement > 10%
1982	Première unité de production de 1 MW (Californie, USA) avec des cellules Arco Si
1985	Les cellules à base de Si donnent un rendement > 20% sous le rayonnement solaire
1994	Des rendements > 30 % avec des cellules à concentration multijonctions à base de GaInP/GaAs (NREL, USA)
1996	Les cellules solaires hybrides à colorants atteignent un rendement de 11% (EPFL, Switzerland)
1998	Cellules couches minces Cu(InGa)Se <sub>2</sub> atteignent un rendement de 19% (NREL, US)
2002	Le photovoltaïque installé mondial cumulatif atteint 2000 MW
2007	Cellules solaires organiques en structure tandem avec un rendement de 6,5 % (UCSB, USA)
2008	Un rendement homologué de 5,9% sur une surface active de 2 cm <sup>2</sup> obtenu par Heliatek, BASF et l'Institut de photovoltaïque appliquée (IAPP) de l'Université technique de Dresde (Allemagne)
2009	Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 6,1 % à base de PCDTBT et PC70BM (UCSB, USA)
	Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 7,4 % à base de PBDTTT-CF et PC70BM (SolarmerEnergy Inc., University of California, University of Chicago, USA)

**Tableau III. 1:** Evénements notables dans l'histoire du photovoltaïques [10].

Cellule solaire et photopile sont des termes équivalents qui désignent généralement des capteurs de petite taille, utilisés soit tels quels, soit en assemblage dans un panneau solaire, ou module photovoltaïque.

Quant au mot photo générateur, il regroupe l'ensemble de ces composants d'énergie lumière en électricité, c'est pourquoi nous l'utiliserons pour les exposés d'ordre général [11].

### **III.6. Cellules photovoltaïques :**

Les cellules solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque » [5], car le soleil est la source lumineuse la plus intense de notre planète, et la plupart des applications sont en plein air. Mais certains préfèrent l'expression énergie lumière, pour insister sur le fait que toute source de lumière, même artificielle (ampoules, tubes fluorescents...), peut générer de l'électricité à travers une cellule solaire [11].

#### **III.6.1. Type des cellules photovoltaïques :**

Dans cette partie, nous présentons les différentes cellules photovoltaïques en donnant leurs caractéristiques principales selon le type de matériaux utilisés.

##### **a) Cellules inorganiques :**

###### ***Cellule silicium***

Le silicium poly cristallin présente une couleur grise. Il est constitué d'une mosaïque de cristaux monocristallins de silicium, d'orientation et de tailles différentes (fig.III.2.a). Le silicium monocristallin ainsi obtenu, sous forme de lingots circulaires, est constitué d'un seul type de cristal et présente une couleur uniforme grise (fig.III.2.b). Le silicium monocristallin, plus élaboré que le silicium poly cristallin, présente un rendement (conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique) supérieure. Sa production demande cependant une plus grande dépense énergétique [12].

###### ***Cellules en couches minces :***

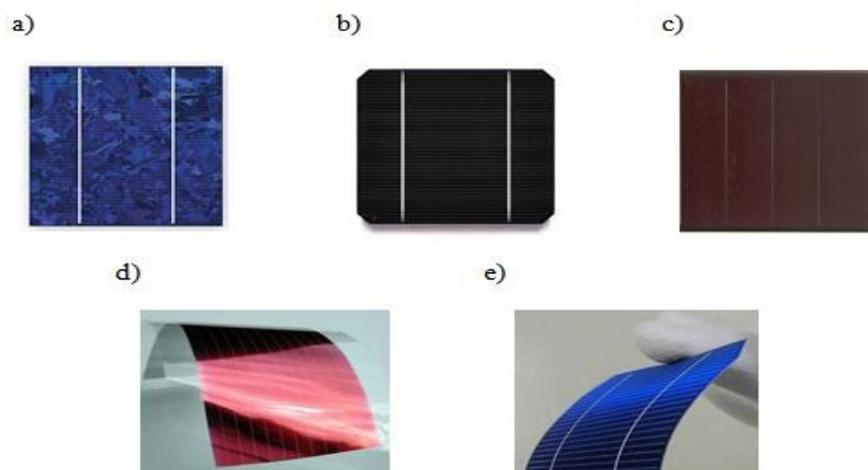
D'autres filières sont en cours de développement dans le secteur photovoltaïque inorganique comme les cellules dites de seconde génération composées de couches minces de matériaux inorganiques (fig.III.2.c). Les matériaux photo actifs les plus utilisés en couche minces sont le silicium amorphe (a-Si), le di sélénium de cuivre indium (CIS), le tellure de cadmium (CdTe). L'avantage principal des cellules photovoltaïques composées de couches minces de matériaux inorganiques est le faible coût de production par rapport à celui des cellules composées de silicium épais [13].

**b) Cellules de Grätzel :**

La couche active de ces cellules est composée d'une matrice poreuse de nano-cristallites d'oxyde métallique semi-conducteur ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) recouverte d'une monocouche de colorant (complexe de ruthénium ou de ditetrabutylammonium). En absorbant les photons le colorant va libérer un électron dans la bande de conduction de l'oxyde métallique. Le colorant oxydé va être ensuite réduit par l'électrolyte liquide qui est en général une solution d'iodure ( $\text{I}_2$ ). Ces cellules ont un coût de production un peu plus élevé que les cellules photovoltaïques tout polymère mais les rendements de conversion photoélectriques avoisinent les 10% [13].

**c) Cellules organiques :**

Les cellules connaissent un développement rapide et leur rendement de conversion ont franchi récemment la barre des 8%. Les matériaux les plus répondus dans le domaine du photovoltaïque organique à base de polymères est le mélange poly(3-hexylthiophene) (P3HT) le 6,6-phenyl-C61-butyric acide méthyl ester(PCBM) (fig.III.2.d) [14].



*Figure III. 2: Des cellules photovoltaïques*

**d) Cellules hybrides :**

Les cellules hybrides sont composées d'un semi-conducteur organique et d'un semi-conducteur inorganique comme l'oxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ), l'oxyde de zinc ( $\text{ZnO}$ ) ou le sélénure de cadmium ( $\text{CdSe}$ ). Le principal avantage de ces cellules par rapport aux cellules organiques est l'absence de 6,6-phenyl-C61-butyric acide méthyl ester (PCBM) ou de fullerène ( $\text{C}_{60}$ ) qui sont les matériaux les plus sensibles à l'oxygène, ce qui permet d'améliorer nettement la stabilité des cellules à l'air ambiant (fig.III.2.e). t. De plus ces

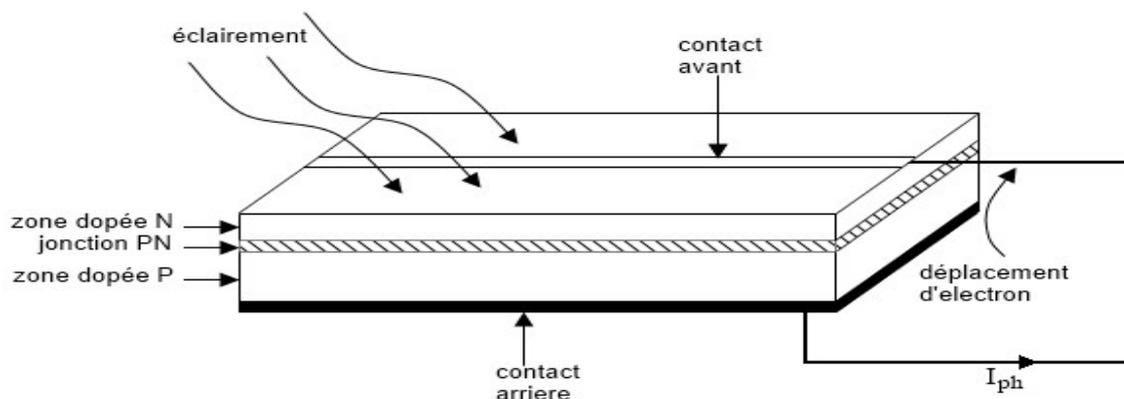
cellules bénéficient des qualités des matériaux organiques comme la souplesse et la facilité de mise en forme et des qualités des matériaux inorganiques comme les mobilités élevées des charges électriques [13].

### III.6.2. Principe de fonctionnement d'une cellule au silicium cristallin :

Le but des cellules photovoltaïques est de convertir l'énergie lumineuse provenant du Soleil en énergie électrique. Ceci se fait en trois étapes [15]:

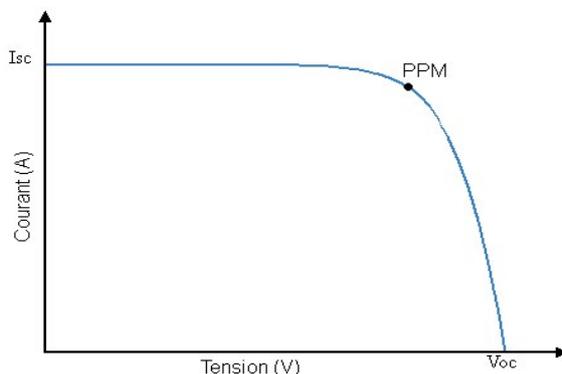
- Absorption des photons de la lumière solaire.
- Conversion de l'énergie reçue par les photons en énergie électrique (particules électriques libres).
- Collecte les particules dans un circuit électrique externe.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant, d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.



**Figure III. 3:** Structure d'une cellule photovoltaïque

En résumé, technologiquement, un capteur PV est proche d'une diode PN de par sa constitution, les matériaux utilisés, et les phénomènes physiques identiques mis en œuvre. Le comportement d'une cellule PV peut donc se modéliser comme celui d'une mauvaise jonction PN autant en statique qu'en dynamique lorsque cette dernière n'est pas éclairée. Pour tenir compte du courant engendré par l'éclairement de la cellule et des différentes résistances modélisant les pertes dues à la connectique, trois termes sont ajoutés  $I_{sc}$ ,  $R_S$  et  $R_P$  [16].



**Figure III. 4:** Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque

A partir de la caractéristique  $I(V)$  sous éclairement de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment :

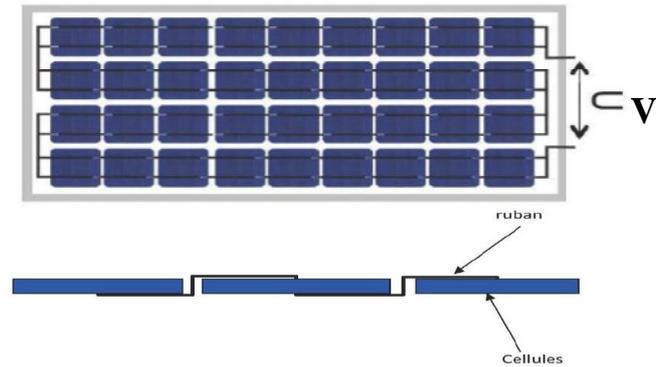
- $I_{sc}$  : Courant de court-circuit (obtenu pour  $V = 0$ )
- $V_{oc}$  : Tension en circuit ouvert (obtenu pour  $I = 0$ )
- Le point de fonctionnement optimal PPM (la puissance maximale de la cellule).

### III.7. Module photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série [18].



**Figure III. 5:** Module photovoltaïque



**Figure III. 6:** Câblage des cellules dans un module

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur [5].

### III.8. Panneau photovoltaïque :

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [5].



**Figure III. 7:** Panneau photovoltaïque

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce que fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui regroupe le tous, Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connexions entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.



*Figure III. 8: Boîte de dérivation.*

La boîte de dérivation est composée également d'un circuit imprimé sur lequel se trouvent :

- Des diodes Schottky séries, placée sur un radiateur, sur chaque entrée, qui empêchent aux batteries de se décharger dans les panneaux.
- Des fusibles de protections qui empêcheront aux batteries de se décharger dans les modules en cas de destruction des diodes antiparallèles.
- Des diodes lumineuses, en parallèle sur chaque fusible de protection. Ces diodes permettant de contrôler individuellement chaque branche de modules. Par exemple une boîte à 4 entrées de 24 Volts sera constituée de deux branches de deux modules, il y aura donc deux diodes qui permettront de constater le fonctionnement de chaque branche.
- Une protection parafoudre (Transil ou VDR) en sortie de la boîte.

Le câblage de ces boîtes permet d'avoir une sortie en 12,24 ou 48 volts selon les modules, elles sont équipées de deux à douze entrées, selon les tensions de sortie. La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend :

- Des besoins en électricité.
- La taille du panneau.
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- La saison d'utilisation [5].

### III.9. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

#### III.9.1. Modèle de cellule :

Les solutions analytiques donnent une compréhension intuitive des cellules solaires et de leurs performances. Elles sont limitées dans leurs précisions en raison des nombreuses hypothèses simplificatrices effectuées. Il est plus direct de résoudre les équations sans la nécessité de faire autant d'hypothèses simplificatrices avec des codes de calcul utilisant la méthode des différences ou éléments finis pour résoudre les équations concernant des matériaux semi-conducteurs constitutifs des cellules solaires. La simulation numérique permet une analyse de la configuration et des conditions de fonctionnement pour laquelle des expressions analytiques simples ne sont pas adaptées.

Une cellule photovoltaïque a un comportement équivalent à une source de courant shuntée par une diode (fig.III.9). Le modèle est complété par une résistance série  $R_s$  due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière et une résistance parallèle ou shunt  $R_p$  qui provient des contacts métalliques et des résistances de fuite sur la périphérie de la cellule

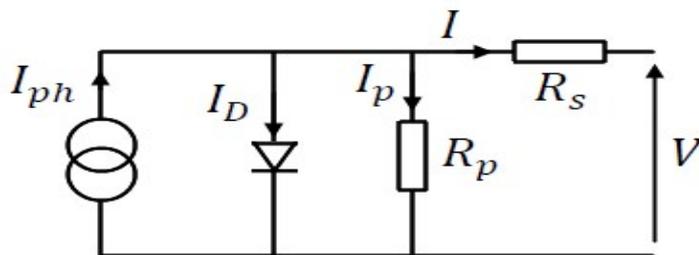


Figure III. 9: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

En notant :

$$I = I_{ph} - I_D - I_p \quad (III.8)$$

Avec:

$$I_p = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (III.9)$$

$$I_0 = I_{sc} / \left[ \exp\left(\frac{V_{oc}}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (III.10)$$

$$I_{sc} = I_{SCR} \left( \frac{G}{1000} \right) \quad (III.11)$$

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad (\text{III.12})$$

Où

$I$ : Courant fourni par la cellule.  $V$ : Tension aux bornes de la cellule  $I_D$ : Courant de diode.

$I_{ph}$ : Photocourant, dépendant de l'intensité de l'irradiation.

$I_p$ : Le courant dérivé par la résistance parallèle.

$I_o$ : Courant de saturation de diode, dépendant de la température

$I_{SC}$ : Le courant de court-circuit de référence

$V_{OC}$ : La tension de circuit ouvert

$V_T$ : La tension thermique

$I_{SCR}$ : Courant de court-circuit de référence.

$R_p$ : Résistance en parallèle, représentant l'admittance parallèle du générateur de courant  
 $R_s$ : Résistance en série, modélisant les pertes ohmiques du matériau et des contacts

$G$ : L'irradiation solaire en  $W/m^2$

$q$ : Charge d'électron  $1,602 \cdot 10^{-9} C$ ,

$K$ : Constante de Boltzmann  $1,381 \cdot 10^{-23} J/K$

$n$ : Facteur de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique.

$T$ : La température effective de la cellule en kelvin.

$$I = I_{ph} - I_o \left[ \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (\text{III.13})$$

La photopile réelle à une résistance série  $R_s$  dont l'influence est plus forte lorsque l'appareil fonctionne dans la région de source de tension, et une résistance parallèle  $R_p$  ayant une influence plus grande dans la région de fonctionnement en source de courant.

La caractéristique (I-V) de la photopile représentée sur la figure III.4 dépend de ses caractéristiques internes ( $R_s$ ,  $R_p$ ) et des facteurs externes comme l'irradiation et la température. Dans les modèles photovoltaïques, on suppose généralement que  $I_{ph} = I_{SC}$  parce

**Chapitre III:** Description générale sur les gisements solaire et la production de l'énergie par le photovoltaïque.

---

que dans la photopile réelle, la résistance série est faible et la résistance parallèle est élevée [7].

Donc l'équation (I. 14) devienne :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{III.14})$$

Calcul de la résistance série dans le point

$$dI = 0 - I_0 \left( \frac{dV + dI \cdot R_s}{nV_T} \right) \left[ \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) \right] \quad (\text{III.15})$$

$$R_s = - \frac{dV}{dI} - \frac{nV_T}{I_0 \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right)} \quad (\text{III.16})$$

Enfin, pour résoudre l'équation de caractéristique non linéaire, on utilise la méthode de Newton décrite par :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (\text{III.17})$$

Où :

$f'(x_n)$ : Le dérivé de la fonction  $f(x_n)$

$x_n$ : La présente itération.

$x_{n+1}$ : L'itération suivante.

Ainsi, on se pose que  $I_{ph} = I_{sc}$ , l'équation (III.15) devient sous la forme suivante :

$$f(I) = I_{sc} - I - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] = 0 \quad (\text{III.18})$$

En remplaçant dans l'équation (III.17), on calcule le courant ( $I$ ) par les itérations [11] :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{sc} - I - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) - 1 \right]}{-1 - I_0 \left( \frac{R_s}{nV_T} \right) \left[ \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_T}\right) \right]} \quad (\text{III.19})$$

### Chapitre III: Description générale sur les gisements solaire et la production de l'énergie par le photovoltaïque.

Les équations précédentes ne sont valables que pour un mode de fonctionnement optimal. Pour généraliser notre calcul pour différents éclairagements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements.

$$I_{SC}(T) = I_{SCR}(T_R) \cdot [1 + \alpha(T - T_R)] \quad (\text{III.20})$$

$$I_0(T) = I_0(T_R) \cdot \left(\frac{T}{T_R}\right)^{\frac{3}{n}} \cdot \left[ \exp\left(\frac{-q \cdot Eg}{nK}\right) \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R}\right) \right] = 0 \quad (\text{III.21})$$

Où

$\alpha$ : Le coefficient de variation du courant en fonction de la température.

$T_R$ : La température de référence, 298k (25°C).

$Eg$ : L'énergie de la bande interdite (gap) du semi-conducteur (en eV)  $Eg \approx 1,12eV$  pour le silicium poly-cristallin à 25°C

Pour réaliser cette modélisation, nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation. Nous avons choisi le modèle photovoltaïque BP SX 150 de BP Solaire. La série SX de BP Solaire fournit une puissance photovoltaïque rentable destinée à un usage général par exploitation directe de charges courant continu, ou de charges courant alternatif sur les systèmes munis d'onduleur. Le module est composé de 54 cellules solaires multi cristallines en silicone connectées en série pour produire une puissance maximale de 200W [6].

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque à la température 25° et l'irradiation 1000 W/m<sup>2</sup> avec 54 cellules en parallèle sont données dans le tableau suivant :

Puissance maximale $P_{max}$	<b>200.143W</b>	Résistance en parallèle $R_p$	<b>415.405 <math>\Omega</math></b>
Tension nominale $V_m$	<b>26.3V</b>	Résistance en série $R_s$	<b>0.221 <math>\Omega</math></b>
Courant nominale $I_m$	<b>8.22A</b>	Coefficient de voltage thermique $kV$	<b>-0.1230 V/K</b>
Courant de court-circuit $I_{SC}$	<b>8.21 A</b>	$KI$	<b>0.0032 A/K</b>
Tension à circuit ouvert $V_{OC}$	<b>32.90 V</b>	$Npp$	1

**Tableau III. 2:** Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque "BP SX 150"

**Chapitre III:** Description générale sur les gisements solaire et la production de l'énergie par le photovoltaïque.

**Modèle de simulation :**

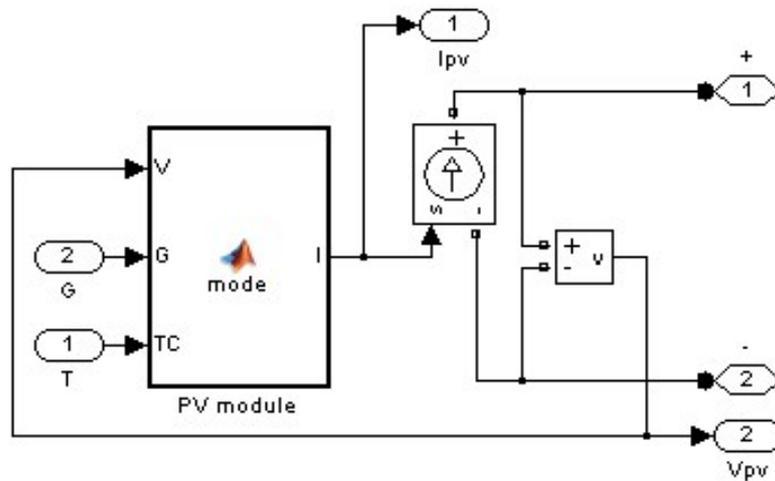
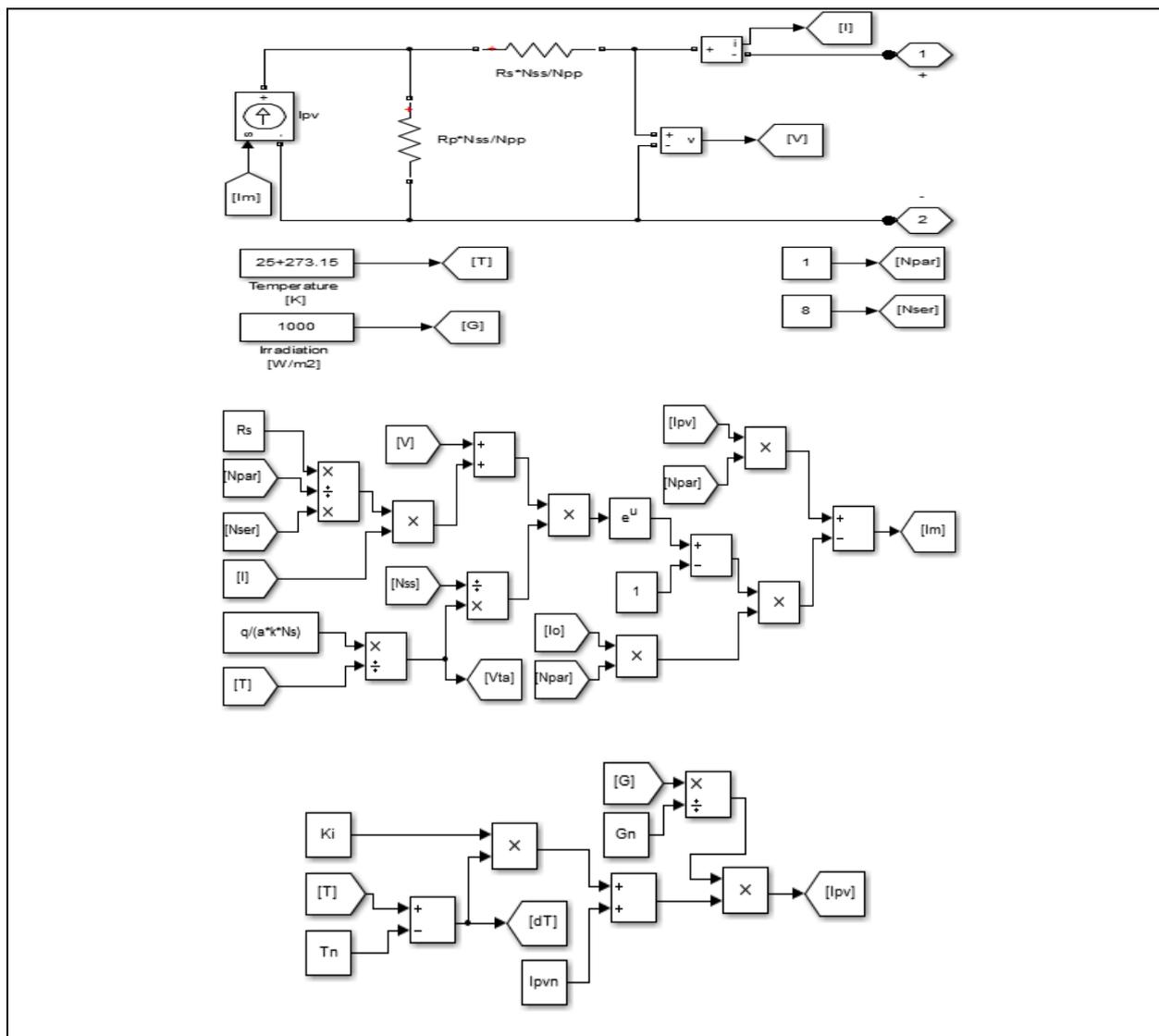
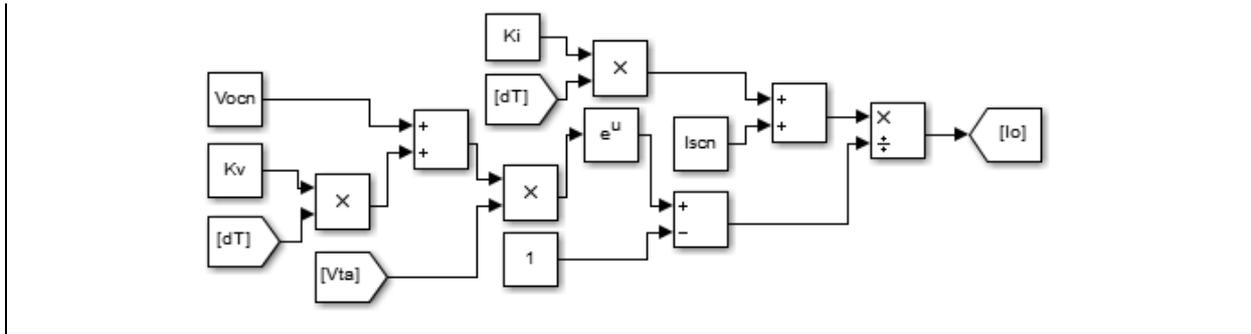


Figure III. 10: Modèle de simulation d'un générateur PV

**Modèles d'un panneau photovoltaïque avec MATLAB :**





**Figure III. 11** Circuit équivalent d'un panneau photovoltaïque avec MATLAB

L'équation de courant  $I_m$  [14]

$$I_m = I_{PV} N_{par} - I_0 N_{par} \left[ \exp \left( \frac{v + R_s \left( \frac{N_{ser}}{N_{par}} \right)}{V_{ta} N_{ser}} \right) - 1 - \frac{v + R_s \left( \frac{N_{ser}}{N_{par}} \right) I}{V_{ta} N_{ser}} \right] \quad (III.22)$$

L'équation de courant  $I_{PV}$

$$I_{PV} = (I_{PVn} + K_i \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (III.23)$$

L'équation de courant  $I_0$

$$I_0 = \frac{I_{scn} + K_i \Delta T}{\exp \left( \frac{V_{ocn} + K_v \Delta T}{a V_{ta}} \right)} - 1 \quad (III.24)$$

### III.10. Avantages et inconvénients d'une installation PV :

#### III.10.1. Avantage :

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliWatt au MégaWatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [5].

### **III.10.2. Inconvénient :**

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15  $MW/km^2$  par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. · Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur [5].

### **III.11. Electronique de puissance :**

L'électronique de puissance est la branche de l'électrotechnique qui a pour objet de l'étude de la conversion statique d'énergie électrique (notamment les structure les composants, les commandes et les interactions avec l'environnement).

L'électronique de puissance traite l'énergie électrique par voie statique. Elle permet :

- Une utilisation plus souple et plus adaptée de l'énergie électrique
- Une amélioration de la gestion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique
- Une discrétion par réduction des masses et des volumes ainsi par un fonctionnement ultrasonore des dispositifs.

La conversion statique est réalisée au moyen de convertisseur statique qu'ils sont des dispositifs qui transforme l'énergie électrique disponible en une forme appropriée à l'alimentation d'une charge. [19]

### **III.11.1. Electronique de puissance et la conversion électrique :**

L'énergie électrique est surtout distribuée sous forme de tensions alternatives sinusoïdales ou continues. L'électronique de puissance permet de modifier la présentation de l'énergie électrique pour l'adapter aux différents besoins. L'électronique de puissance utilise des convertisseurs statiques. Ces derniers utilisent des interrupteurs électroniques [20].

### **III.11.2. Convertisseurs électriques :**

Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer la tension électrique pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative.

L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...) [21].

La tension fournie par les panneaux photovoltaïques est une tension de type continu pour l'adapter à nous besoin il y a deux sorte de convertisseur (les hacheurs DC-DC, les onduleurs DC-AC)

### **III.11.3. Les Interrupteurs :**

Ces interrupteurs sont réalisés par un ou plusieurs composants électroniques a semi-conducteur. On a vu qu'en électronique de puissance, on met en œuvre des convertisseurs utilisant des interrupteurs électroniques fonctionnant soit à l'état passant (fermé), soit à l'état bloque (ouvert). Le passage d'un état à l'autre, appelé commutation, s'effectue périodiquement. On note  $T$  cette période [22].

Selon le composant utilisé, la fréquence de découpage  $f$  à laquelle est soumis le composant change. En général, on cherche à utiliser la fréquence la plus élevée possible. Cependant, plus la puissance nominale  $P_n$  d'un convertisseur est élevée, plus cette fréquence est faible [22].

La figure (fig.III.12) présente un diagramme a échelle logarithmique des domaines d'utilisation de chaque composant.

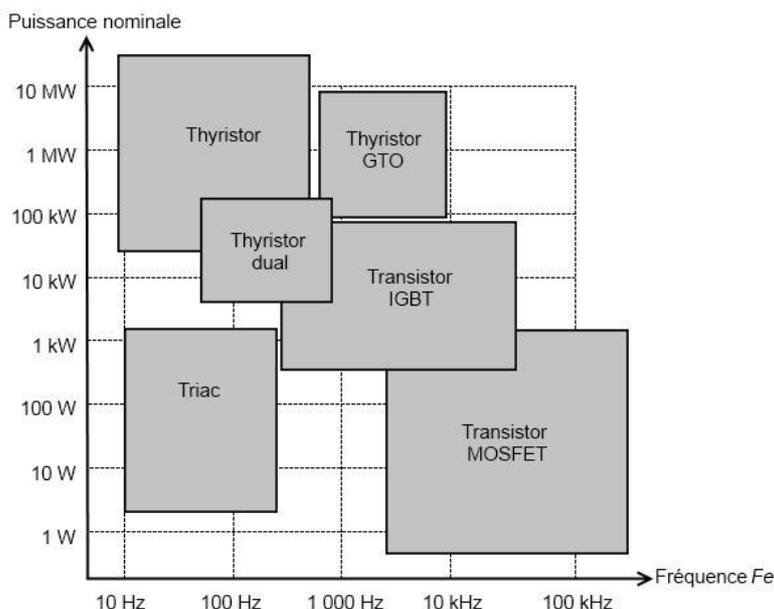


Figure III. 12: Diagramme puissance-fréquence des composants

### III.12. Les Hacheurs :

Un hacheur permet de régler le transfert d'énergie d'une source continue vers la charge avec un rendement élevé. Selon la structure, il peut être abaisseur ou élévateur de tension et, dans certaines conditions, renvoyer de l'énergie à l'alimentation. Il est utilisé dans les alimentations et pour le pilotage des moteurs. [23].

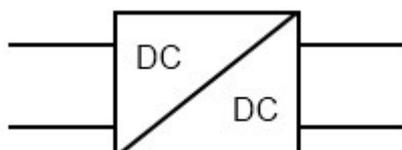


Figure III. 13: Symbole d'un convertisseur DC-DC

#### III.12.1. Exigences de l'utilisateur :

La fonction essentielle d'un convertisseur de puissance est double : d'une part adapter la forme de l'énergie aux besoins d'une charge (typiquement en transformant une tension en une tension continue et/ou en modifiant le niveau de la tension) et d'autre part stabiliser ce flux d'énergie en filtrant autant que possible les fluctuations de la source.

Dans le principe, assurer ces deux fonctions n'est pas excessivement complexe : fabriquer une alimentation élémentaire demande un nombre de composants relativement réduit. Mais l'utilisateur privé ou professionnel a beaucoup d'autres exigences. Idéalement, un convertisseur doit en effet [24] :

- délivrer une ou souvent plusieurs tensions parfaitement continues, éventuellement ajustables et stables quel que soit le courant demandé ;
- posséder un rendement élevé;
- présenter un niveau de sécurité élevé, notamment en répondant aux normes d'isolation entre l'utilisateur et le réseau ;
- posséder une fiabilité élevée relativement à la durée de vie de l'application, en ce compris la résistance aux contraintes de l'environnement (vibrations, température, humidité, etc)
- ne pas être une source de perturbations pour le réseau électrique amont ou les équipements environnants ni être trop sensible aux perturbations émanant de ceux-ci (compatibilité électromagnétique)
- être la plus petite et la plus légère possible
- et bien entendu être de préférence peu coûteuse...

### III.12.2. Hacheur boost :

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [26].

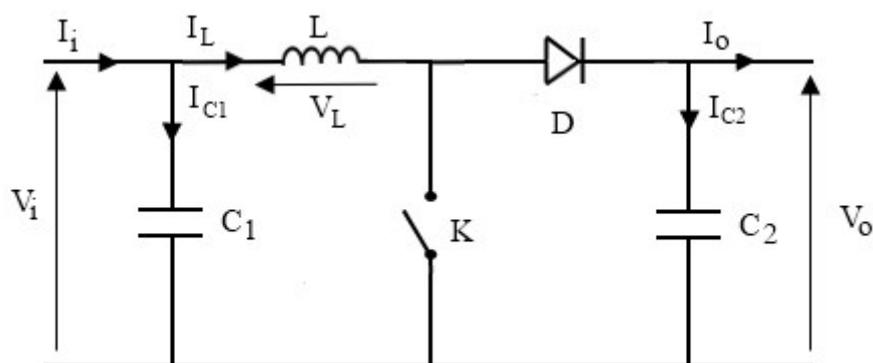


Figure III. 14: Schéma électrique d'un hacheur boost

#### a) Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée  $\alpha T_e$ , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps  $t \in [\alpha T_e, T_e]$ , l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du

courant dans la diode de roue libre D. On a alors  $V_K = V_0$ . En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [27] :

$$V_0(1 - \alpha) = V_i \quad (\text{III.25})$$

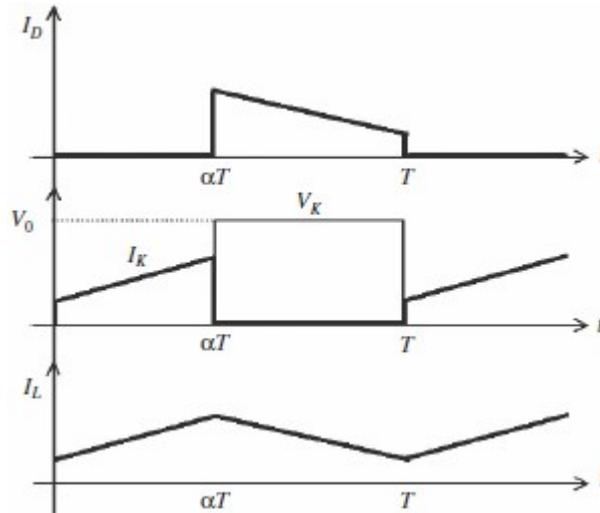


Figure III. 15: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

**b) Modèle mathématique équivalent :**

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure (fig.III.17), présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c.à.d. entre  $[0, \alpha T_e]$  [24].

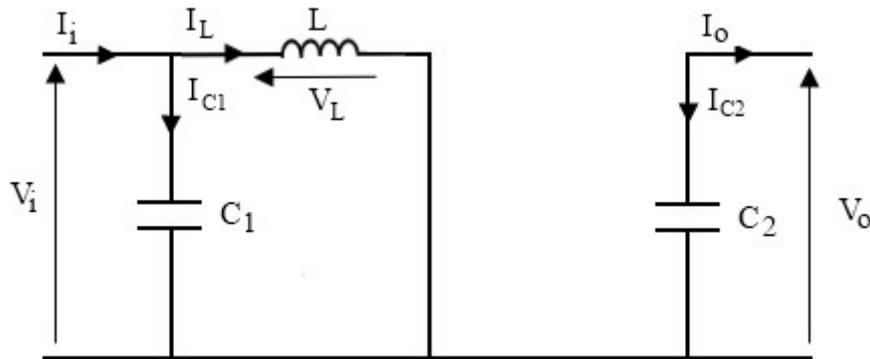


Figure III. 16: Schéma électrique d'un hacheur boost fermé

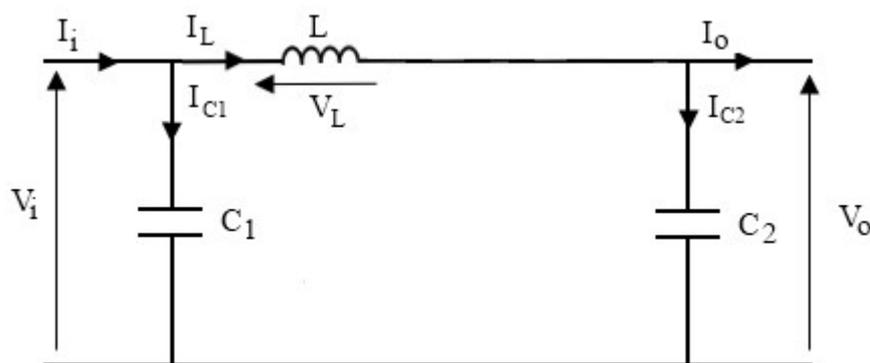
Comme pour le circuit buck, l'application des lois de Kirchoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (\text{III.26})$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \quad (\text{III.27})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (\text{III.28})$$

À l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant :



**Figure III. 17:** Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (\text{III.29})$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \quad (\text{III.30})$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \quad (\text{III.31})$$

### III.13. Commande MPPT:

La poursuite de point de puissance maximale (MPPT) (The maximum power point tracking) est nécessaire pour extraire le maximum de puissance du module PV. En général, un convertisseur DC/DC est placé entre la PV et la charge, et en faisant varier le rapport cyclique du point de fonctionnement [28].

### **III.14. Les méthodes de poursuite de MPP :**

Il existe de nombreux algorithmes utilisés pour trouver le point de puissance maximale. Idéalement, le suivi de la puissance se fait automatiquement pour s'adapter aux conditions météorologiques variables [28].

#### **III.14.1. Méthodes à contre réaction de tension :**

Ce genre de mécanismes repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la PWM de commande afin d'annuler cette erreur. Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe) on a trois types de méthodes [29]:

- Méthode à tension de référence fixe
- Méthode à tension de référence en fonction de  $V_{oc}$
- Tension de référence extrême (Cellule pilote)

#### **III.14.2. Méthodes à contre réaction de courant :**

Cette méthode utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système [30]. Permet de savoir la valeur du courant optimal dans lequel doit fonctionner le panneau pour extraire le maximum de puissance [29]

- Méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit  $I_{sc}$
- Méthode de maximisation du courant de sortie

#### **III.14.3. Méthodes à contre réaction de puissance :**

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les panneaux solaires. Ainsi pour un point donné on fait la recherche dans un certain sens, si on a une augmentation de la puissance du panneau alors on maintient cette direction de recherche, sinon on cherche dans le sens opposé [29].

### III.14.3.1. Algorithme incrémentation de la conductance :

L'algorithme par incrémentation de conductance se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro. Ceci peut être décrit par les équations suivantes [30]:

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (\text{III.32})$$

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{1}{V} \quad (\text{III.33})$$

On définit la conductance de la source  $\frac{1}{V}$  et l'incrément de la conductance  $\frac{dI}{dV}$ .

Puisque la tension  $V$  du panneau est toujours positive, la relation (III.23) explique que le point de puissance maximale MPP est atteint si la conductance de la source égale l'incrément de la conductance de la source avec un signe moins, et qu'elle est à gauche de ce point lorsque la conductance est supérieure à l'incrément de la conductance et vice-versa, [29] comme suit :

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ si } \frac{1}{V} > -\frac{dI}{dV} \quad (\text{III.34})$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ si } \frac{1}{V} = -\frac{dI}{dV} \quad (\text{III.35})$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ si } \frac{1}{V} < -\frac{dI}{dV} \quad (\text{III.36})$$

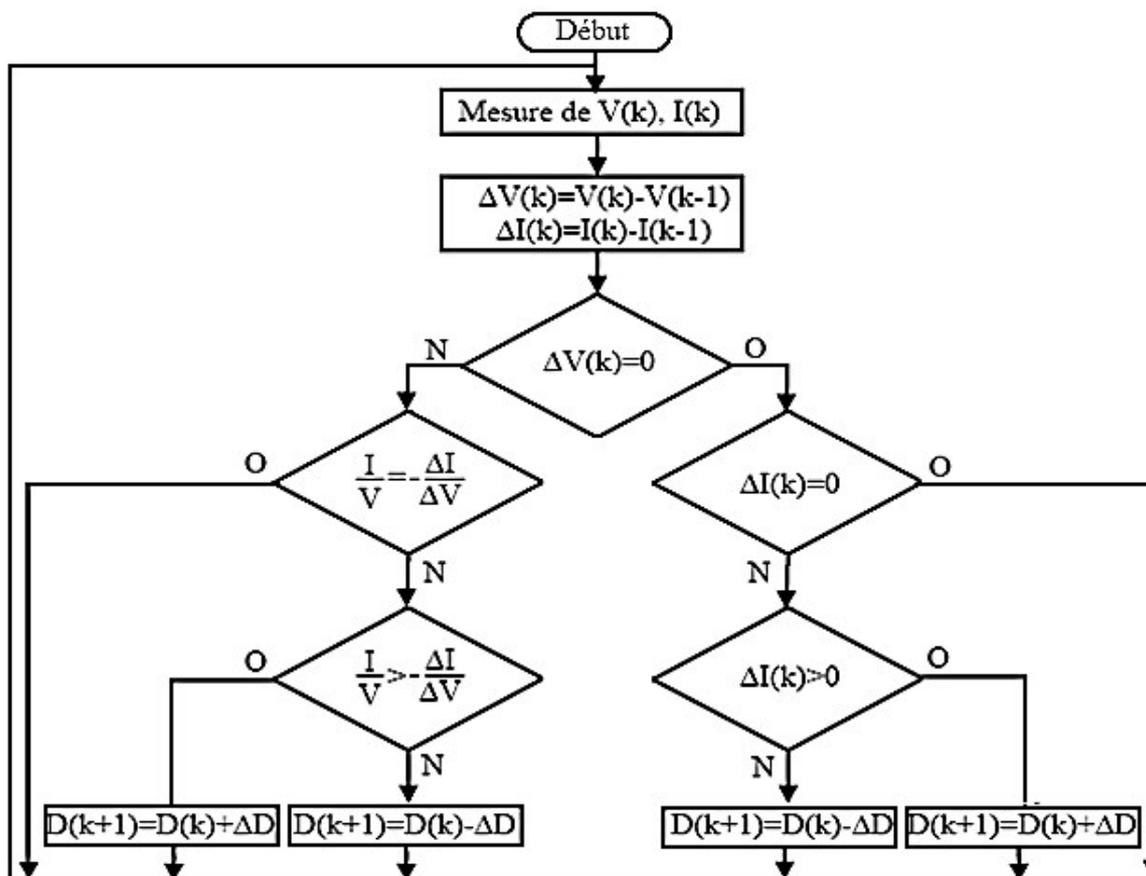


Figure III. 18: Algorithme incrémental conductance

### III.14.3.2. Algorithme perturbation et observation :

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence, ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique (D) [29].

Si la valeur de la puissance actuelle  $P(k)$  du générateur est supérieure à la valeur précédente  $P(k - 1)$  alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O) est donné par la Figure Fig.III.20 [29].

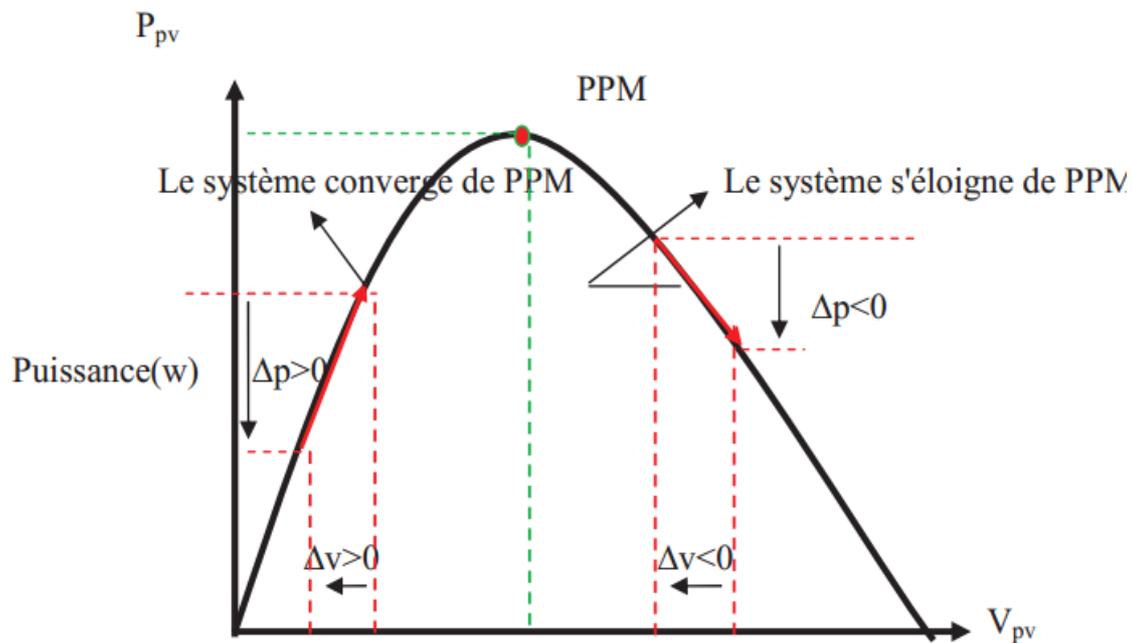


Figure III. 19: Schéma de convergence vers le PPM par P&O

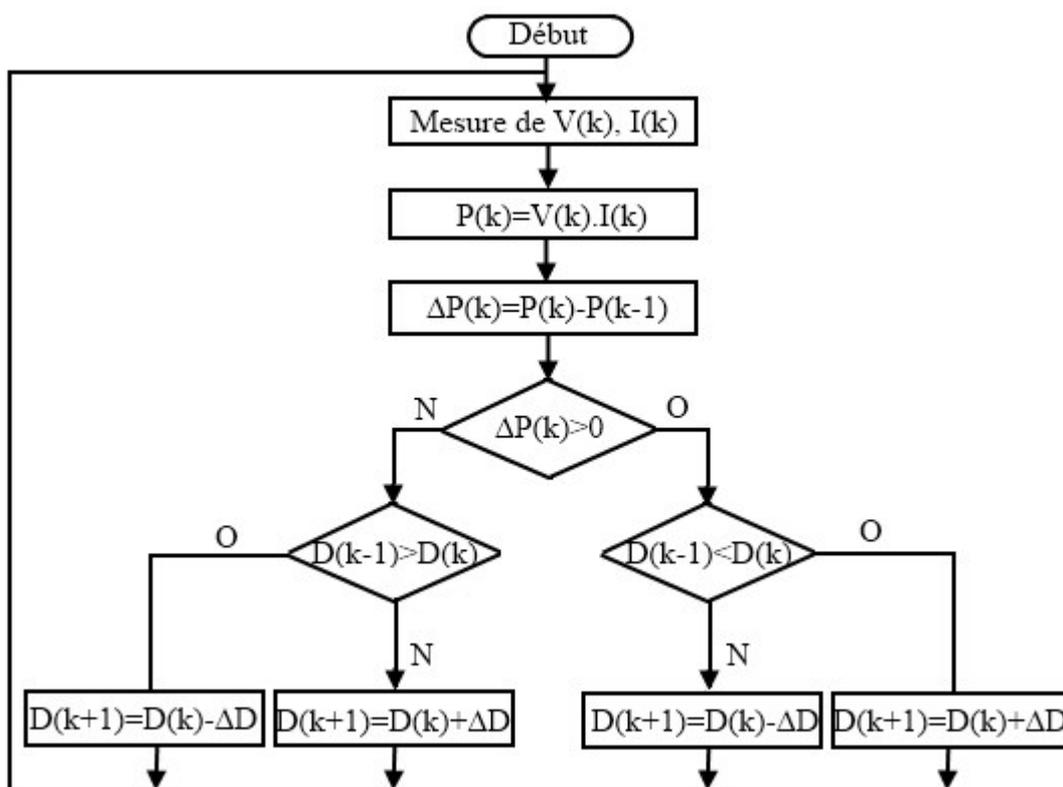
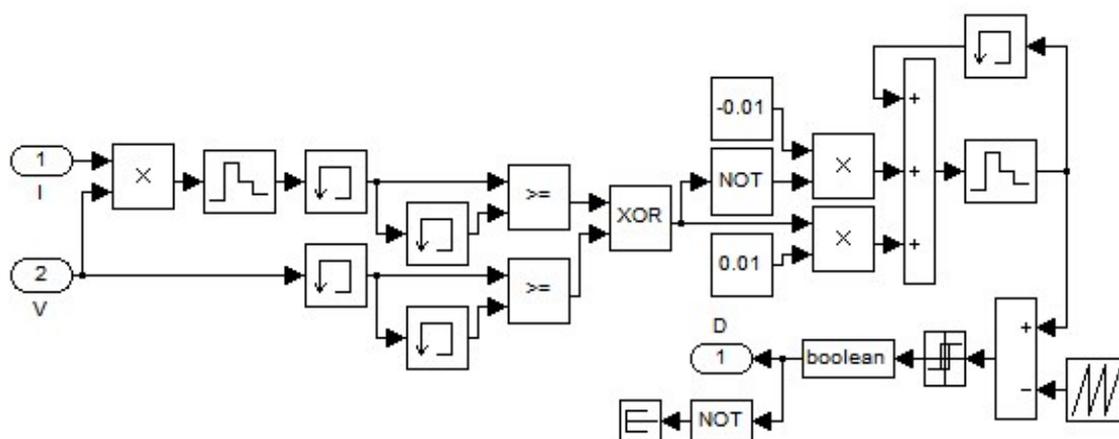


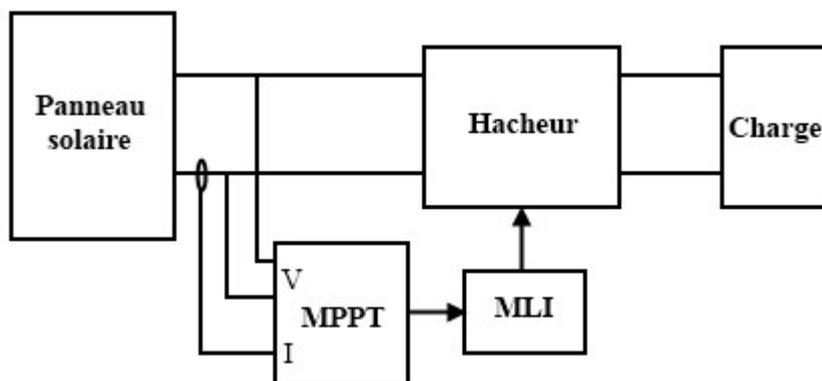
Figure III. 20: Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O)



*Figure III. 21: Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O)*

### III.15.Simulation du system photovoltaïque avec hacheur commandé en MPPT:

La figure (fig.III.21) montre le diagramme synoptique d'un système photovoltaïque composé avec un module PV avec un hacheur commandé en MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du module.



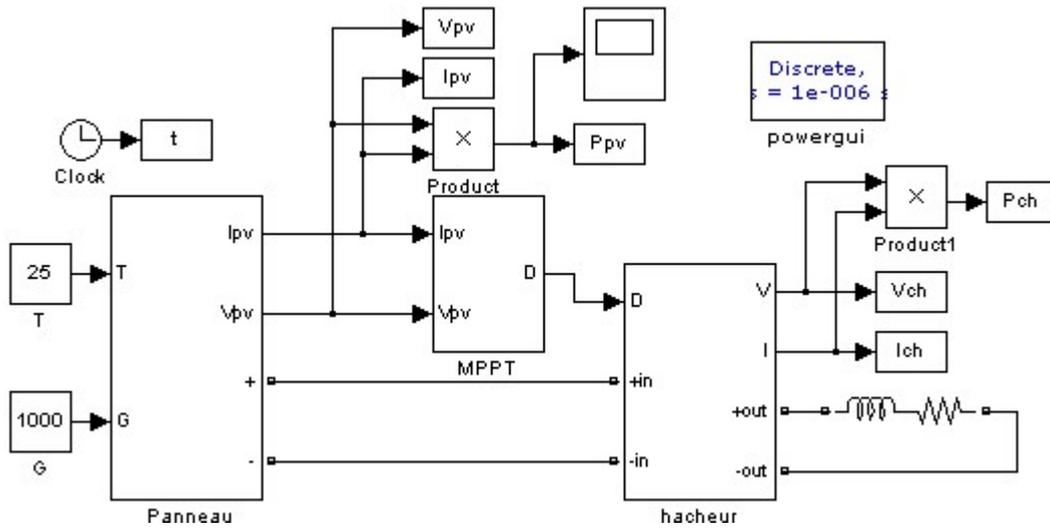
*Figure III. 22: Schéma d'un système photovoltaïque avec convertisseur DC-DC commandé par la MPPT*

Dans cette simulation on a utilisé un générateur PV de type BP SX 150 un hacheur boost caractérisé par :

$$L = 11\mu H C_1 = 1mF C_2 = 1100\mu F$$

on a utilisé aussi une commande MPPT de type P&O .

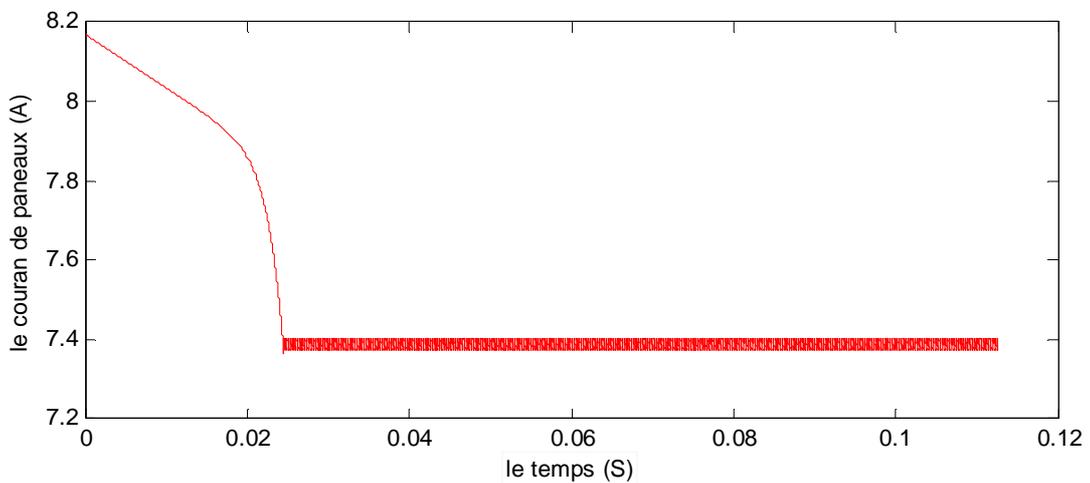
**III.15.1. Schéma de simulation :**



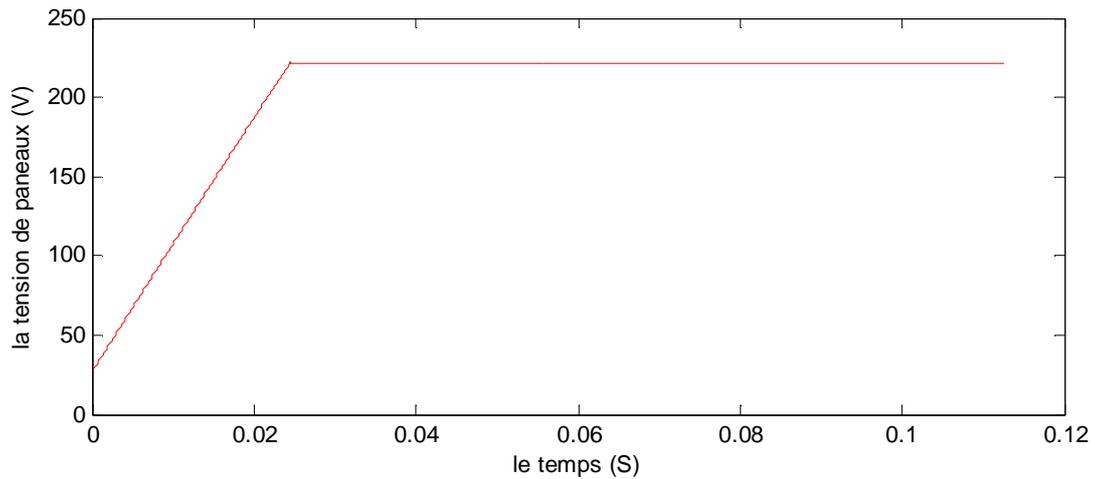
**Figure III. 23:** Schéma de simulation d'un PV et un hacheur commandé en MPPT

**III.15.2. Résultat de simulation:**

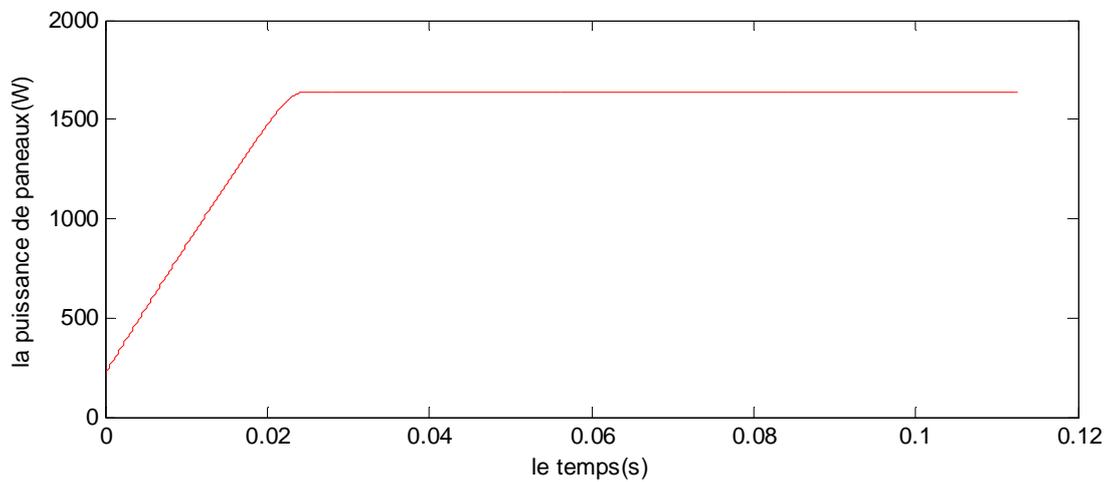
En mode standard 25 °C, 1000 W/m<sup>2</sup> on cherche a déterminé le courant, la tension et la puissance du panneau. Les résultats obtenus sont présenté dans les figure III.24.25.26 On constate une bonne corrélation avec la théorie.



**Figure III. 24:** Le courant de panneau

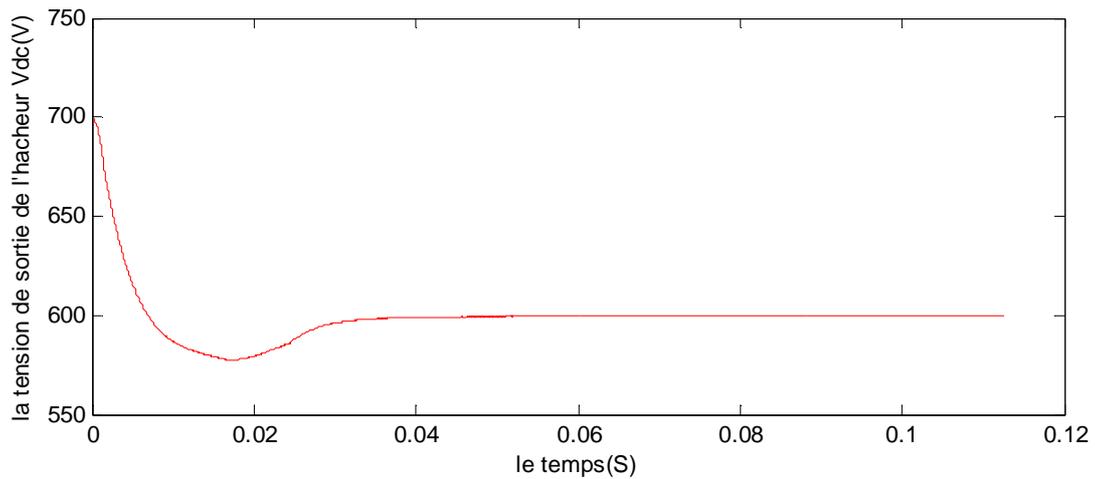


*Figure III.25: la tension de panneau*

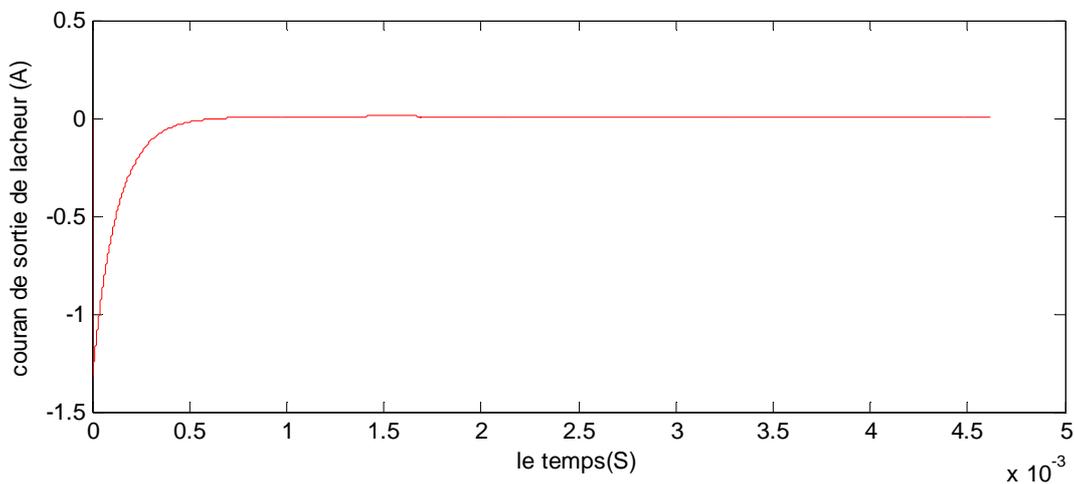


*Figure III. 26: La puissance de module photovoltaïque*

D'après la figure (fig.III.25), au départ la tension de PV prend un saut pour qu'elle se stabilise à la valeur désirée. D'après la figure (fig.III.24), on remarque qu'au départ le courant prend la valeur de court-circuit ensuite il prend la valeur nominale. Dans la figure (fig.III.26) on remarque que le générateur PV fonctionne en puissance maximale.



**Figure III. 27:** La tension de sortie de hacheur



**Figure III.28:** Le courant de sortie de hacheur

D'après les figures (fig.III.27 et 28) on remarque que les valeur de tension, courant de sortie de hacheur est inferieur a celles de PV car la commande MPPT impose un rapport cyclique  $D > 0.5$ .

### III.16. Les onduleurs :

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

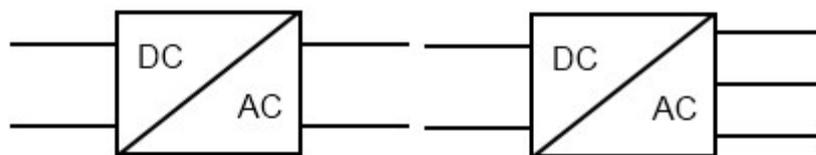


Figure III.29: Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé

### III.16.1. Structure d'onduleur :

L'idée de base de l'onduleur NPC est l'obtention d'une tension de sortie à trois niveaux par la superposition de deux interrupteurs élémentaires alimentés chacun par une source de tension continue distincte. L'onduleur triphasé à trois niveaux utilisé est constitué de trois bras et de deux sources de tension continue.

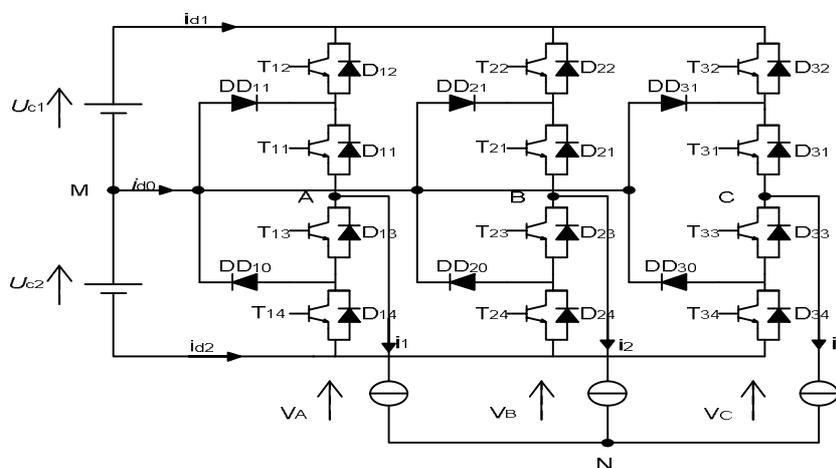


Figure III.30: Onduleur triphasé à trois niveaux

### Classification des onduleurs :

Les onduleurs sont classés selon le mode de commutation :

- les onduleurs autonomes qui génèrent leur propre fréquence et leur propre tension alternative. Dans ces onduleurs la commutation est forcée [31].
- les onduleurs non autonomes dont la fréquence et la tension alternative sont imposées par le réseau qu'ils alimentent. Dans ces onduleurs la commutation est naturelle. Elle est naturelle en ce sens que ce sont les tensions alternatives du réseau qui effectuent le transfert du courant d'un thyristor à l'autre [31].

Selon la nature de la source continue :

- Onduleur de tension : la source DC impose la tension, la charge AC impose le courant sinusoïdal [25].

- Onduleur de courant : la source DC impose le courant, la charge AC impose la tension sinusoïdale [25].

### **III.16.2.Principe de fonctionnement :**

Il existe plusieurs types de commande d'onduleurs comme (commande symétrique (adjacente), Décalée (disjointe), MLI...).les différentes commandes ont le but d'obtenir l'allure sinusoïdale ou niveau de la sortie .et pour chaque commande le principe de fonctionnement se change.

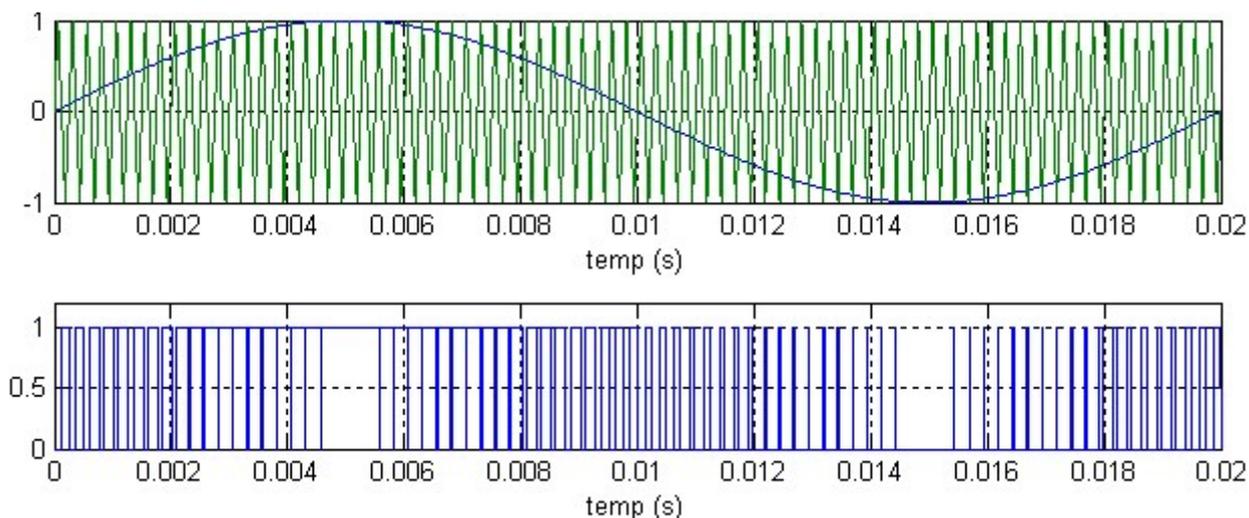
### **III.16.3. Commande MLI :**

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou Pulse Width Modulation (PWM) permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Cependant, cette technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques de courant [33].

La modulation MLI est fortement inspirée des techniques utilisées dans la transmission de l'information. Elle consiste à moduler une onde porteuse triangulaire (issue d'un découpage à fréquence  $f_d$ ) par une onde modulante sinusoïdale (fréquence  $f_s$ ) à fréquence beaucoup plus basse [33].

### **III.16.4.Elimination d'Harmoniques sélective.**

Cette technique de modulation, qui est une méthode très efficace et très importante pour la commande des onduleurs 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. [31]



**Figure III. 31:** Principe de la commande MLI et les impulsions d'un interrupteur

### **III.17. Conclusion :**

Le monde de la conversion photovoltaïque connaît depuis quelques années une évolution profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans l'énergie solaire et la constitution d'un système photovoltaïque et nous avons exploré le principe de la conversion photovoltaïque et les technologies utilisées ainsi que les différents types des cellules photovoltaïques.

On a étudié quelques types de convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et le hacheur mixte (dévolteur-survolteur) la commande MPPT ainsi que les convertisseurs DC-AC et la commande MLI.

D'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque que le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles d'atteindre la puissance maximale de générateur PV.

# Chapitre IV

*Raccordement du systèmes PV au réseau.*

### IV.1. Introduction :

La consommation énergétique mondiale augmente sans cesse associée à une réduction des ressources énergétiques fossiles. Avec l'ouverture des marchés de l'énergie électrique et les incitations étatiques, les productions décentralisées basées sur les énergies renouvelables se développent dans tous les pays. Parmi les sources renouvelables, les éoliennes et les systèmes photovoltaïques (PV) présentent de grands intérêts.

Ce chapitre présente le contexte de notre étude sur le raccordement d'une centrale PV au réseau de distribution. Pour cela, nous présentons tout d'abord les réseaux de distribution (nature, structure). Ce chapitre aborde ensuite les interactions entre le réseau de distribution et les systèmes PV.

### IV.2. Réseau électrique :

Le système électrique est structuré en plusieurs niveaux, assurant des fonctions spécifiques propres, et caractérisés par des tensions adaptées à ces fonctions. Il est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution. Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique, ces frontières étant définies par les postes sources et les transformateurs (voir Figure IV.1) [1].

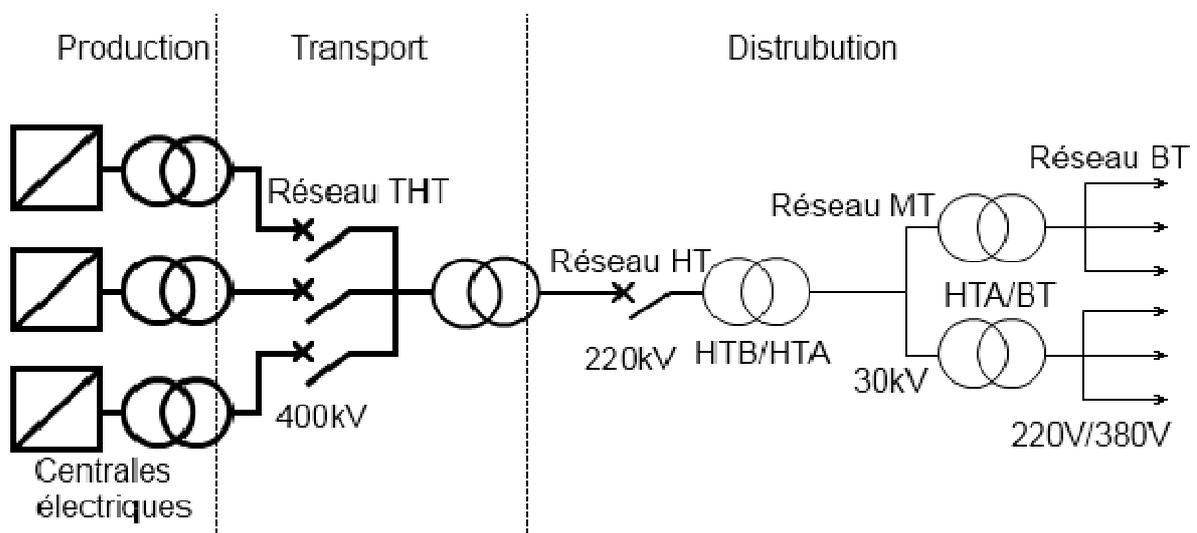


Figure IV. 1: Schéma générale de production, transport et distribution de l'énergie électrique

- Les réseaux de transport à très haute tension (THT.400 kV). C'est à ce niveau de tension que sont assurées les interconnexions entre régions au niveau national et les échanges (importation/exportation) d'énergie électrique au niveau international.
- Les réseaux de répartition à haute tension (HT,de 60 kV à 220 kV) assurent, à l'échelle régionale, assurant le transport de l'électricité vers les zones de consommations et à quelques gros clients industriels directement connectés à celui-ci.
- Les réseaux de distribution sont les réseaux d'alimentation de l'ensemble de la clientèle. On distingue deux sous niveaux : les réseaux à moyenne tension (MT, de 5,5 kV à 30 kV) et les réseaux à basse tension (BT, de 110 V à 220 V). Les réseaux de distribution moyenne tension transportent l'énergie vers les réseaux à basse. Les réseaux basse tension sont destinés à alimenter des clients à faible demande d'énergie [1,2].

### **IV.3. Problème de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau :**

Les problèmes concernant l'interconnexion du système photovoltaïque au réseau sont [3]:

- Le débrogage de système photovoltaïque si le réseau présente une défaillance (le problème d'islanding).
- La protection contre la foudre.
- La qualité de puissance fournie au réseau.
- Les effets des systèmes multiples sur une partie du réseau, en particulier monophasé non équilibré.
- Le dosage fiable des flux de puissance.
- Risques techniques ET financiers.

### **IV.4. Perturbations des réseaux électriques :**

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants [3] :

- La fréquence
- Amplitude des trois tensions
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde
- La symétrie du système triphasé (égalité des modules des trois tensions, leur déphasage et l'ordre de succession des phases).

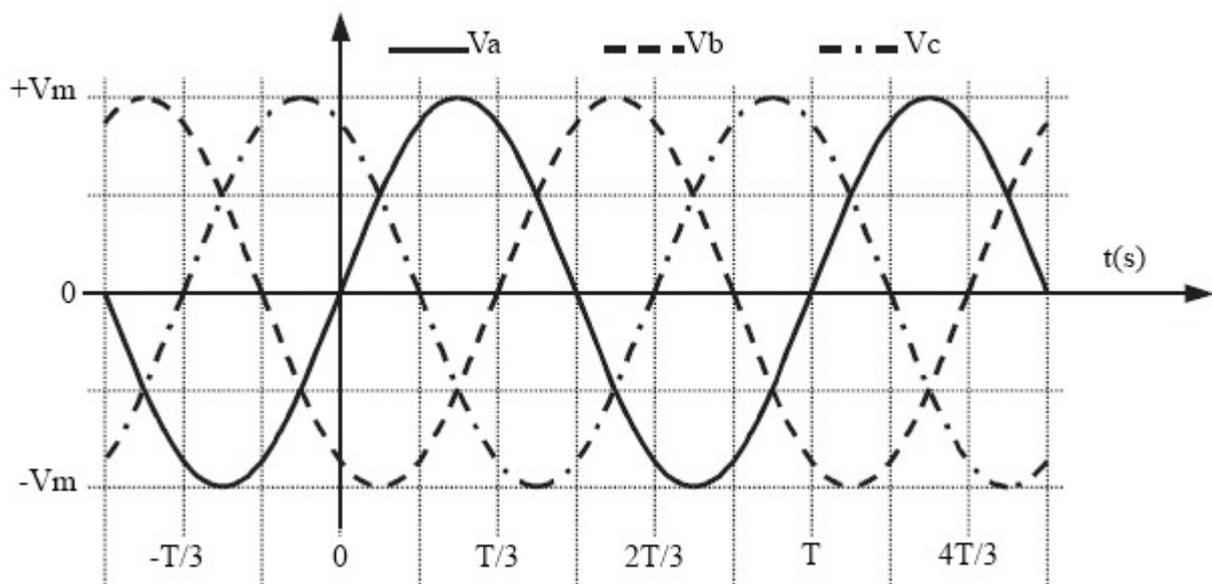
Des relations contractuelles peuvent s'établir entre fournisseur d'énergie et utilisateur final, mais aussi entre producteur et transporteur ou entre transporteur et distributeur dans le cadre d'un marché. Une application contractuelle nécessite que les termes soient définis en commun et acceptés par les différentes parties [3].

Afin de décrire certaines perturbations et de donner le niveau de conformité de l'énergie fournie. Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités précédemment peuvent se manifester par : un creux ou une coupure de tension, une fluctuation de la tension, un déséquilibre du système triphasé de tension, une fluctuation de la fréquence, la présence d'harmoniques et/ou d'inter-harmoniques [3].

#### IV.5. Modélisation de réseau BT :

##### IV.5.1. Modèle mathématique:

Le réseau triphasé trois grandeurs sinusoïdales de même fréquence, déphasées entre elles de  $2\pi/3$ , et ayant même valeur efficace, forment un système triphasé équilibré [4].



**Figure IV. 2:** Système de tensions triphasé équilibré

Réseau de distribution électrique. Il est basé sur un système triphasé de tensions. On peut généralement considérer que  $(V_a V_b V_c)$  est un système de tensions triphasé équilibré direct. Il en est de même pour  $(U_{ab} U_{bc} U_{ca})$ . On a [23]:

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(\omega t) \\ V_b = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c = V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

$$\begin{cases} U_{ab} = V_a - V_b \\ U_{bc} = V_b - V_c \\ U_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Relations pour un système triphasé équilibré

$$\begin{cases} V_m = \sqrt{2}V_{eff} \\ U_m = \sqrt{3}V_m \\ U_{eff} = \sqrt{3}V_{eff} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

#### IV.5.1 Schéma de simulation de réseau :

On va utiliser un réseau BT (260V/25KV) avec une fréquence de 50Hz

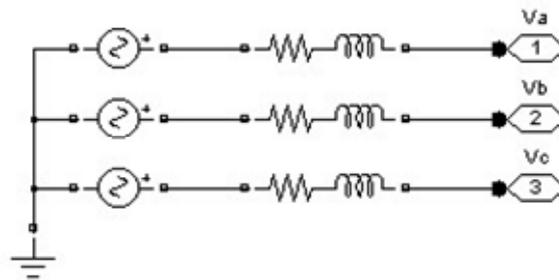


Figure IV. 3: Schéma de simulation de réseau

#### IV.6. Simulation global de PV raccordé au réseau :

##### IV.6.1. Schéma de simulation:

Dans cette simulation on a utilisé un champ photovoltaïque de 1500Kw raccordé à un réseau de distribution de 260V, un hacheurboost caractérisé par :

$$L = 11\mu H, C_1 = 1mF, C_2 = 1100\mu F$$

Contrôlé par une commande MPPT de type P&O et un onduleur triphasé commandé en pwm(voltage source converter)

Simulation de l'onduleur à trois niveaux branché sur source photovoltaïque

La simulation du troisième étage qui correspond au composant clé du système PV, l'onduleur a trois niveaux qui relie le GPV à la charge ou un réseau électrique. Le système

est en boucle ouverte, commandé par MLI (modulation de largeur d’impulsion). La fréquence 50 Hz et amplitude de 260V.

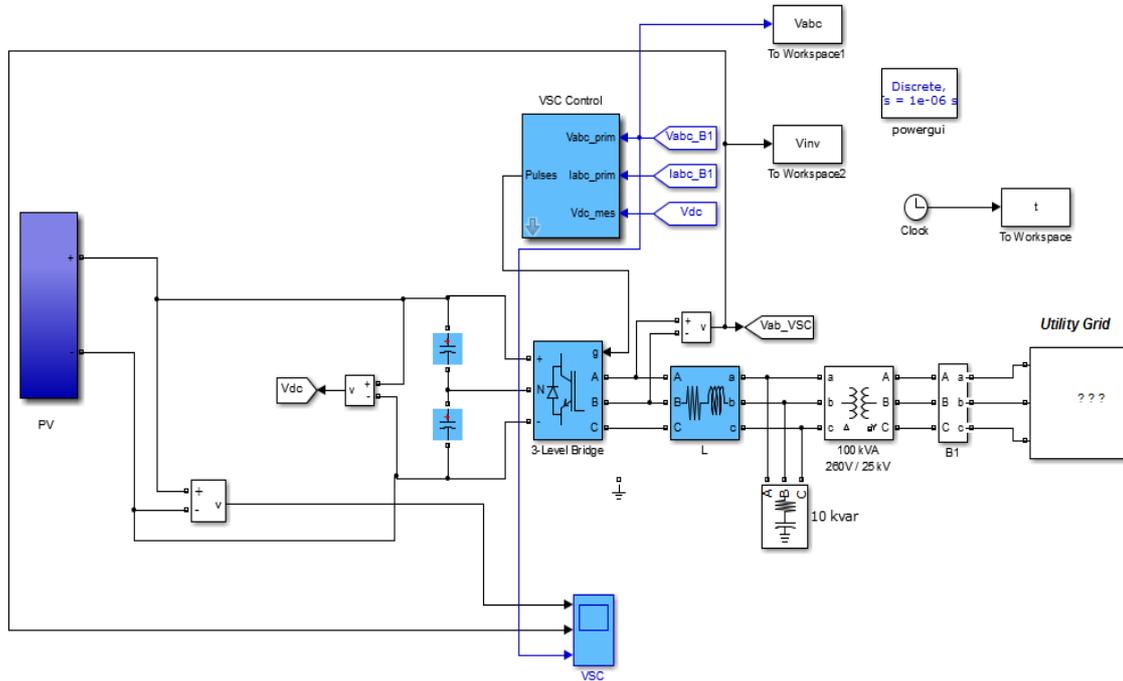


Figure IV. 4: Schéma de simulation global PV raccordé au réseau

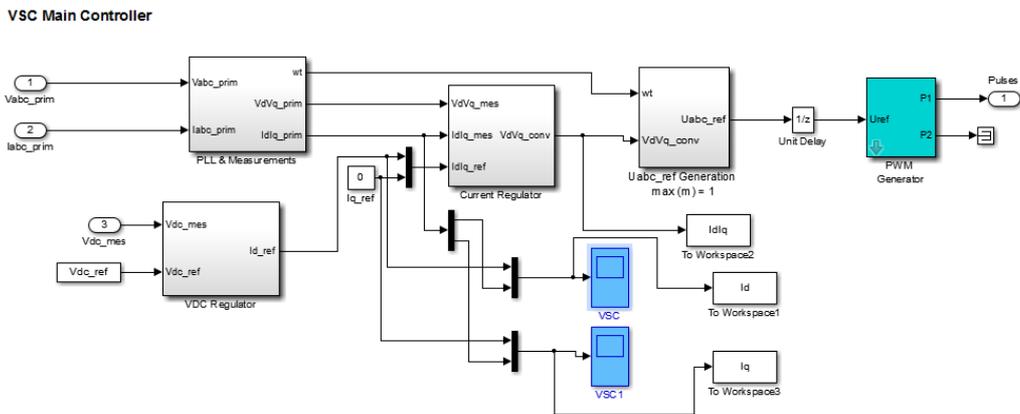


Figure IV. 5: Bloc de voltage source Controller

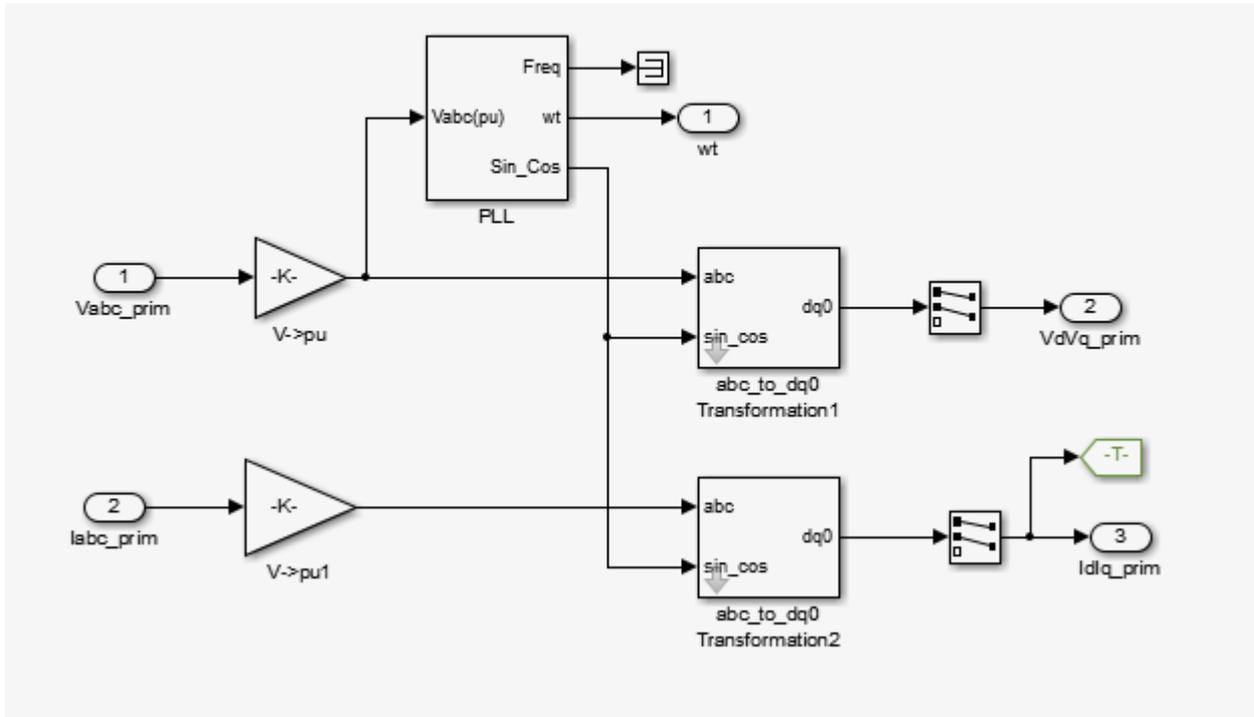


Figure IV. 6: bloc de pll

IV.6.2. Résultat de simulation:

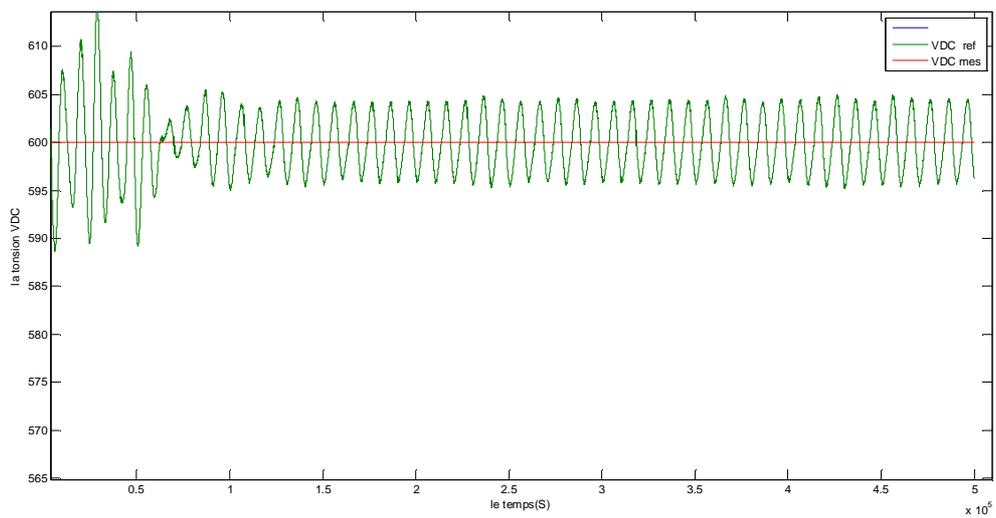


Figure IV. 7: La tension Vdc mes et Vdcreff

D’après la figure (IV.7) on a donné une valeur de  $V_{dcref} = 600$  et mesuré la valeur de  $v_{dc}$  est une sinusoïde qui converge au voisinage de 600V

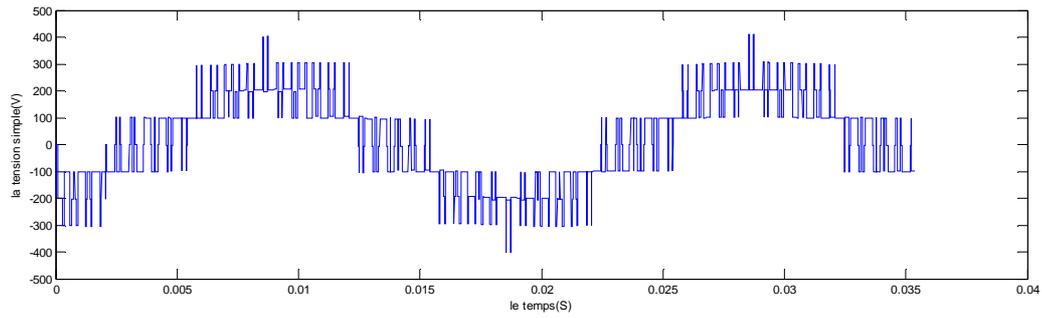


Figure IV. 8: la tension simple de sortie de l'onduleur 3 niveaux

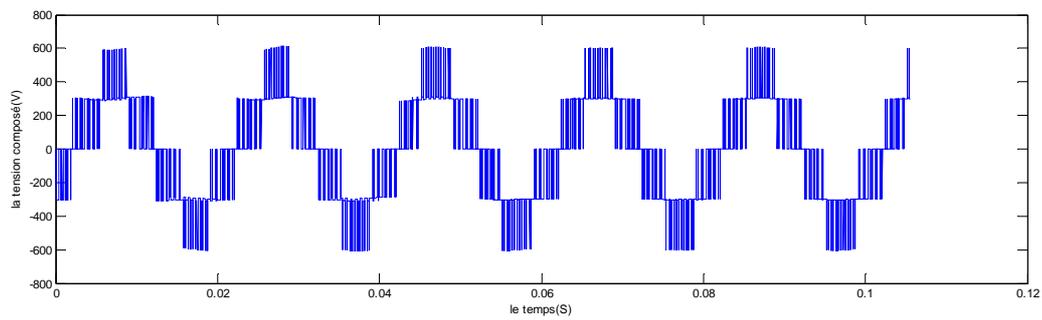


Figure IV. 9 : la tension simple de l'onduleur 3 niveaux

D'après la figure(IV.8) et (IV.9) la tension de sortie de l'onduleur ont une forme périodique qui s'approche d'une sinusoïde. Et pour la tension composé est en 3 étages.

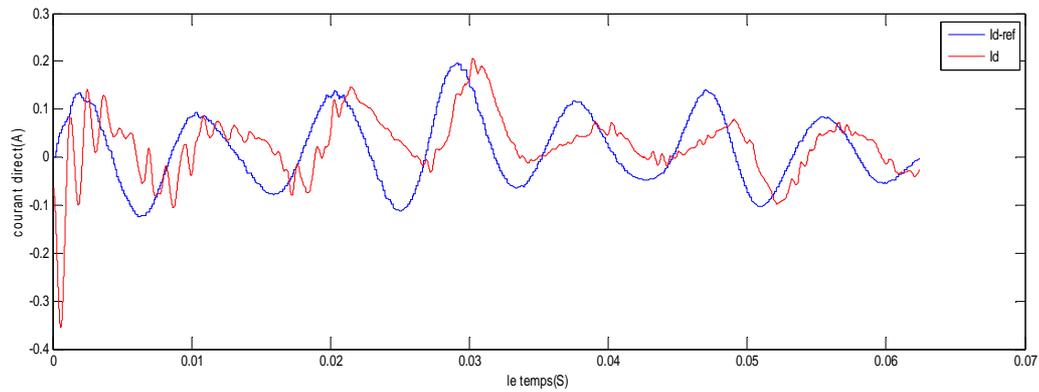
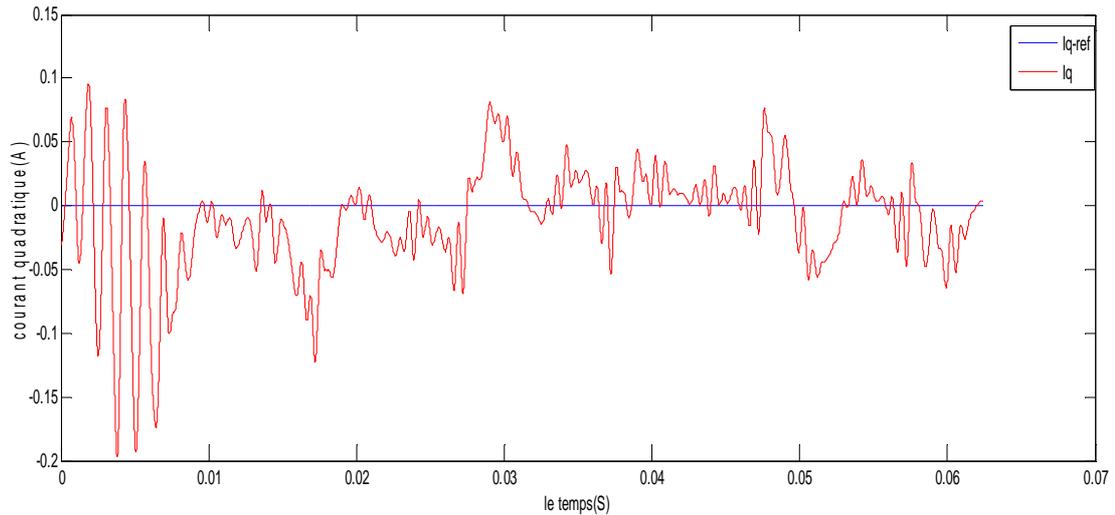


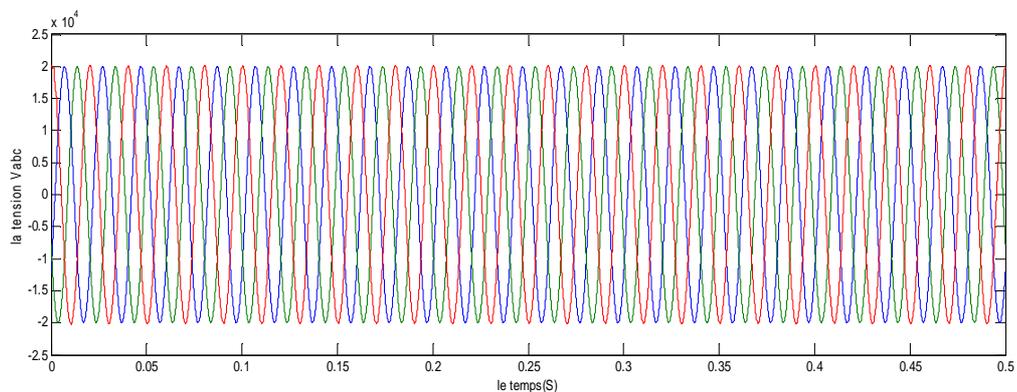
Figure IV. 10: Le courant  $I_d$  ref et  $I_d$



**Figure IV. 11:** le courant  $I_{q\text{-ref}}$  et  $I_q$

La figure (IV.10) représente les courant direct et le courant direct de référence et on remarque qu'ils sont proches.

La figure (IV.11) représente le courant quadratique et le courant quadratique de référence. Étant donné  $Q=0$ , donc  $I_q=0$  et  $I_{q\text{-ref}}$  converge vers 0.



**Figure IV. 12:** la tension injectée dans le réseau

La figure (IV.12) présente les tensions de sortie de l'onduleur après le filtrage qui sont injectées dans le réseau. Les tensions ont 25 kV comme valeur efficace et une fréquence de 50 Hz, ces deux grandeurs sont nécessaires pour faire le couplage entre les sources de tensions.

#### IV.7. Conclusion

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

## Conclusion Générale

---

## **Conclusion générale**

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude des onduleurs multinationaux dans le système photovoltaïque connecté aux réseaux électriques.

Ce mémoire est consacré à l'élaboration d'un système photovoltaïque connecté au réseau. Il consiste à choisir une configuration convenable d'onduleur NPC qui sera connecté au réseau toute

En assurant un fonctionnement optimal de la source PV. Une boucle de régulation est aussi introduite pour répondre aux questions d'interconnexion.

Les résultats de la simulation ont démontré l'intérêt d'un dispositif de recherche de la puissance maximale. La méthode P&O (perturbation and observation) a été choisie pour implanter un algorithme de poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale du panneau PV (MPPT).

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

## Références bibliographiques

---

### Références bibliographiques

- [1] **L.Hornfors A.Petersson, T.Thiringer and T.Petru.** *Modeling and experimental verification of grid interaction of a DFIG wind turbine, IEEE Transactions on Energy Conversion.* Vol. 20, N .4, pp. 878-868, December 2005.
- [2] **A.Talha.** *Modélisation et Commande d'un Onduleur `a Sept Niveaux `a Structure NPC Application à la Conduite d'une Machine Synchrone `a Aimants Permanents, Thèse de Magister.* USTHB, 1999.
- [3] **B.Hemici.** *Commande de la vitesse d'un moteur asynchrone par les variables rotoriques, Thèse de magister en ´électrotechnique.* ENP d'Alger, 1987.
- [4] **R.A.Lakin B.Hopfensperger, D.J.Atkinson.** *Stator-flux-oriented control of a doubly fed induction machine with and without position encoder, IEE Proceedings on Electronic Power Applications.* Vol.147, N .4, pp. 354-362, July 2000.
- [5] **F.A.Farret B.Palle et M.G.Simoès.** *Full Expandable Model of Parallel Self-Excited Induction Generation.* EE Proc-ElectIr, Power Appl, Vol 152, No1 January 2005.
- [6] **C.Bourillon.** *Wind Energy-Clean Power for Generations.* RenewableEnergy, Vol 16. pp. 948953, 1999.
- [7] **A.Talha M.O.Mahmoudi D.Beriber, E.M.Berkouk.** *Study and control of two two-level PWM rectifiers-clamping bridge-two three-level NPC VSI cascade. Application to double stator induction machine, IEEE Power Electronics Specialists Conference.* Pp.3894–3899, Aachen Germany, 2004.
- [8] **T.Kompa A.Samour D.Schulz, R.Hanitsch.** *Comparative Power Quality Investigations of Variable Speed Wind Energy Converters with Doubly fed Induction and Synchronous Generator, PCIM Power Quality Conference Nuremberg.* pp. 39-44, May 14-16, 2002.
- [9] **Janaka Ekanayakeand Nick Jenkins.***Comparison of the Response of Doubly Fed and Fixed Speed Induction Generator Wind Turbines to Changes in Network Frequency, IEEE Transactions on Energy Conversion.* Vol.19, N .4, pp. 800-802, December 2004.
- [10] **P.Migliore E.Muljadi et K.Pierce.** *Control Strategy for Variable-Speed, Stall-regulated Wind Turbines.* American Conrols Conference, Philadelphia, PA, Juin 24-26, 1998.
- [11] **E.Muljadi ET C.P.Buterfield.** *Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine G´en´eration.* IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.37, No1, Jan. /Feb. 2001.
- [12] **R.Abdessamad et M.Kadjoudj.** *Mod´elisation des machines ´electriques.* Presse de l'université de Batna, Algérie, 1987.

## Références Bibliographiques

---

- [13] **F.Poitiers.** *Etude et Commande de Génératrice Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne -Machine asynchrone `a cage autonome -Machine asynchrone `a doublé alimentation reliée au réseau, Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique.* Ecole Polytechnique de l'Universit´e de Nantes, 2003.
- [14] **D.J.Adams F.Z.Peng, J.W.Mckeever.** *Cascaded Multilevel Inverter for Utiling Applications, IEEE.* 0-7803-3932-0, 2000.
- [15] **F.Labrique G.Seguir.** *Les convertisseurs de l'électronique de puissance, T1 et T2.* Ed.DUNOD, 1989.
- [16] **A.Bendre G.Venkataramanan.** *Reciprocity-Transposition-Based Sinusoidal Plusewidth Modulation for Diode-Clamped, IEEE Transactions on Industrial Electronics.* Vol.49, N 5, October 2002.
- [17] **H.Bu`hler.** *Electronique de réglage et de commande.* Ed.DUNOD, 1987.
- [18] **H.Camblong.** *Minimisation de l'Impact des Perturbations d'Origine Eolienne dans la G´en´eration d'Electricité par des A´ero-g´en´erateurs à vitesse variable, Thèse de Doctorat d'Etat en Automatique.* Ecole Nationale Supérieure d'Arts ET M´etiers, 2003.
- [19] **Ricardo J.Mantz Hernan de Battista and Carlos F.Chrstiansen.** *Dynamical Sliding Mode Power Control of Wind Driven Induction Generators, IEEE Transactions on Energy Conversion.* Vol.15, N .4, pp. 851-857, December 2004.
- [20]**S.Sirisukprasert.** *Optimised Harmonic Stepped-Waveform for Multilevel Invrter, Master thesis.* Institut Polytechnique Virginia, 1999.
- [21]**J-S.Mariéthoz.** *Etude formelle pour la synthèse de convertisseurs multiniveaux asymétriques : Topologies, Modulation, et Commande, Thèse de doctorat.* Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.
- [22]**M. Aime.** *Evaluation et optimisation de la bande passante des convertisseurs statiques, Application aux nouvelles structures multicellulaires, thèse de doctorat.* Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003
- [23]**Siroj Sirisukprasert,** "Optimized Harmonic Stepped-Waveform for Multilevel Inverter", Thesis for the Degree of Master of Science in Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute, September 1999.
- [23]**B. K. Bose,** "Power Electronics and AC Drives", Edition Practice Hall, 1986.
- [24]**L. M. Tolbert,** "Multilevel converters for Large Electric Drives", IEEE Transactions on Power Electronics, 2002.

## Références Bibliographiques

---

- [25] **Takafumi Maruyama, Masayochi Kumano, Masahiro Ashiya**, "A New Asynchronous PWM Method for a Three Level Inverter", IEEE, pp.366-371, 1991.
- [26] **Y Cheng, ML Crow**, « A Diode Clamped Multilevel for the Statcom Bess », IEEE Transactions on Power Electronics, 2002.
- [27] **Kelaiaia Mounia Samira**, « Amélioration de la Qualité d'Énergie Délivrée Par Un Onduleur Multiniveaux Alimentant Une Machine Asynchrone A Cage » Thèse De Doctorat, Département d'Electrotechnique, 2007.
- [28] **BOUAKAZ OUAHID**, "Contribution à l'Analyse des Onduleurs Multiniveaux Fonctionnement Symétrique et asymétrique ", Mémoire d'ingénieur d'état, Département d'électrotechnique, université de Batna, 2005.
- [29] **E.M.Berkouk**, « Contribution à la Conduite des Machines Monophasées et Triphasées Alimentées par des Convertisseurs Directs et Indirects, Applications aux Gradateurs et Onduleurs Multiniveaux », Thèse de Doctorat, CNAM 1995.
- [30] **D. Roye**, "Modélisation, contrôle vectoriel et DTC ", HERMES Science Europe Ltd, 2000, sous la direction de Carlos Canudas de Wit, Page(s) : 81 -132 vol.1
- [31] **Ameur Aissa**, "Commande Sans Capteur de Vitesse par DTC d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents Dotée d'un Observateur d'ordre Complet à Modes Glissants", Thèse Magister /2005 université Batna
- [32] **Swierczynski Dariusz**, "Space Vector Modulated-Direct Torque Controlled (DTC-SVM) Inverter-Fed Induction Motor Drive", Thesis Université de Technologie Lublin Poland 2005.
- [33] **Belakehal Sultane**, "Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables", thèse de Doctorat, université de Constantine, 10/06/2010
- [34] **Belhadj Mohammed**, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome", Mémoire de Magister, université de Bechar, 2008
- [35] **Louazene Mohamed Lakhdar**, "Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla", Mémoire de Magister, université de Batna, 12/06/2008
- [36] **Camara Mohamed Ansoumane**, "Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs", thèse de Doctorat, université de Paris, 04/07/2011
- [37] **Metri Noura**, "élaboration de module  $\pi$ -conjuguées à base de triphénylamine pour la réalisation de dispositifs photovoltaïques hybrides sensibles", thèse de Doctorat, 30/09/2011
- [38] **M. Capderou**, "Atlas Solaire de L'Algérie", Tome1,2, OPU 1983.
- [39] **Dang Minh Trung** "élaboration de cellules solaire photovoltaïque à base de polymères conjugués, études des systèmes", thèse de Doctorat, université de Bordeaux 26/11/2009

## *Références Bibliographiques*

---

- [40] **Anne Labouret, Pascal Cumunel**, "Cellules solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque", Dunod, 5e édition, 2010
- [41] **Hallou Solaire**, "La fabrication des cellules photovoltaïques", fiche technique
- [42] **Florent Monestier**, "Amélioration de l'absorption photonique dans les cellules photovoltaïques organiques", thèse de Doctorat, Université de Marseille, 10/04/2008
- [43] **Gernigon Véronique**, "Utilisation de copolymères à blocs dans les cellules solaires organiques morphologie, transport de charges et conversion photovoltaïque", thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 04/01/2012
- [44] **J.Pireaux**, "Physique et énergie Travail sur les panneaux photovoltaïques", Université de Namur, 2006-2007
- [45] **Cabal Cédric**, " Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 15/12/2008
- [46] **Semassou Clarence**, "Aide à la décision pour le choix de sites et systèmes énergétiques adaptés aux besoins du Bénin", thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, 15/12/2011
- [47] **C.Galize**, "introduction à l'électrotechnique et à l'électronique de puissance" cours, université de Montpellier II, 12/02/2002
- [48] **Merabet Kamel**, " commande mu d'un onduleur triphasé basée sur la dispersion de la tension triphasée", Université du Québec, 2011
- [49] **BenseddikOthmane, Djaloud Fathi**, "Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque", Mémoire de Master, Université de Ouargla, 27/06/2012
- [50] **Michel Pinard**, " convertisseurs et électronique de puissance", Dunod, 2007
- [51] **Guy Chateigner, Michel Boës**, "Manuel de génie électrique", Dunod, 2007
- [52] **Abouchabana Nabil**, "Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT", Mémoire de Magister, Université de Laghouat, 2009
- [53] **Lequeu Thierry**, "Cours d'électronique de puissance", IUT GEII 2<sup>ème</sup> année, Option EEP, 2004/2005
- [54] **Bogdan Grabowski, Christian Ripoll**, " Aide-mémoire Électronique", Dunod, 5e édition, 2008
- [55] **Jordana Bratt**, "gridconnectedpvinverters:modeling and simulation", Mémoire de Master, Université de San Diego State, 2011
- [56] **Sobaihi Khaled**, " Etude et réalisation d'un hacheur de Tracking du Point de Puissance Maximale (MPPT) à contre réaction de tension", Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2003
- [57] **Abbassen Lyes**, "étude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque",  
Mémoire de Magister, Université de Tizi Ouzou, 05/05/2011

## *Références Bibliographiques*

---

- [58] **Philippe Barrade**, "électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaire", press polytechnique et universitaires, 1ère édition 2006.
- [59] **Wildi Théodore**, Sybille Gilbert, " électrotechnique", de boeck, 4e édition, 2005
- [60] **Touzani Youssef**, " Commande aléatoire du convertisseur Buck-Boost triphasé à prélèvement sinusoïdal du courant", thèse de Doctorat, Université de Clermont-Ferrand, 10/07/2006
- [61] **Y. Sahali, M. K. Fellah**, «Technique de modulation à sélection d'harmonique à Eliminer (SHEPWM) pour la commande des onduleurs de tension trois niveaux monophasé et triphasés», Intelligent Control and Electrical Power Systems Laboratory ICEPS, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2003
- [62] **Thi Minh Chau LE**, " Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects contrôle/commande et rejet de perturbations", thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 25/01/2012
- [63] **SONELGAZ Spa**, "Notice d'information", fiche technique, 2006
- [64] **Abbassen Lyes**, "étude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque", Mémoire de Magister, Université de Tizi Ouzou, 05/05/2011
- [65] **Guy Chateigner, Michel Boës**, "Manuel de génie électrique", Dunod, 2007

## ملخص

تستخدم محولات الطاقة في العديد من المجالات وتلعب في مجال الفولتية الضوئية. هذا العمل عبارة عن دراسة في معظم الأنظمة الفولتية الضوئية المتصلة بالشبكة الكهربائية.

من اجل استغلال فعال للمحطة الضوئية في تشغيل الواح شمسية في طاقتها القصوى مهما تكن التغيرات الجوية. وعليه، يجب ضمان توافق بين مصدر الطاقة والحمولة وذلك باستعمال بطر للجهد. في حين ان عملية ضخ الطاقة المولدة نحو شبكة والتحكم في الجهد والتوتر يكون عبر المموج المتعدد الطبقات من فئة (Npc) باعتماد طريقة التحكم الجيبية المتعددة (MLI)

**الكلمات المفتاحية:** مواد الطاقة الشمسية، الشبكة الكهربائية، مطبر.

## Résumé:

Les convertisseurs électrique sont utilisés dans plusieurs domaines et jouent un rôle primordial dans les applications photovoltaïque. Ce travail constitue une étude sur les convertisseurs utilisé dans la part des systèmes photovoltaïque (PV) qu'ils sont raccordé au réseau électrique. Nous avons effectué une étude pour une fonction optimale du système, on doit assurer un fonctionnement à puissance maximale du générateur photovoltaïque quel que soit la condition climatique.

L'adaptation entre le générateur photopholtaïque et la charge a été effectuée moyennant le convertisseur DC/DC.

L'injection d'énergie vers le réseau est assure vie un onduleur multiniveau de type NPC à commande MLI triangul-sinusoïde multiple.

**Les mots clés :** Sources photovoltaïque, réseau électrique, MLI, NPC.